

На правах рукописи

Михайлова Юлия Михайловна

**ГЕНЕРАЦИЯ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И АТТОСЕКУНДНЫХ  
ИМПУЛЬСОВ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕРХИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ МИШЕНЯМИ И  
ТОНКИМИ ПЛЕНКАМИ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва  
2006

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Платоненко Виктор Трифионович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Черепенин Владимир Алексеевич

доктор физико-математических наук  
Урюпин Сергей Александрович

Ведущая организация: Московский физико-технический институт

Защита состоится 23 ноября 2006 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2 Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, КНО, аудитория им. С.А. Ахманова.

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

Автореферат разослан « 23 » октября 2006 г.

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

Т.М. Ильинова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одним из наиболее значительных достижений современной оптики безусловно является внедрение в экспериментальную практику компактных источников сверхкоротких световых импульсов с интенсивностями более  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> [1]. На основе концепции параметрического усиления чирпированных импульсов в настоящее время получены лазерные импульсы с рекордными значениями мощности (до десятков тераватт [2,3]) при рекордно высоком значении контраста импульса ( $5 \cdot 10^{11}$  по интенсивности [4]) и ультракороткой длительности, включающей только несколько оптических колебаний [2]. Развитые технологии достижения высокого пространственного качества лазерного пучка с помощью деформируемых зеркал позволяют фокусировать мощное излучение в пятно диаметром несколько микрон и обеспечивают, таким образом, интенсивности порядка  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup> [5]. Для характеристики интенсивности сверхсильного лазерного излучения удобно использовать безразмерный параметр  $a = eE/mc\omega_0$ , где  $e, m$  – заряд и масса электрона,  $E, \omega_0$  – амплитуда электрического поля световой волны и несущая частота,  $c$  – скорость света. При этом интенсивность светового поля можно выразить как  $I = a^2 I_{\text{рел}}$ , где  $I_{\text{рел}} = c/8\pi \cdot (mc\omega_0/e)^2 \approx 1.37 \cdot 10^{18} \cdot (\lambda[\text{мкм}])^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup> – релятивистская интенсивность. При этой интенсивности амплитудное значение кинетической энергии электрона, который до взаимодействия с лазерным полем был неподвижен, достигает значения  $mc^2/2$ . Развитие техники генерации высокоинтенсивных лазерных импульсов сделало возможным проведение лабораторных экспериментов по взаимодействию излучения с веществом в *субрелятивистском* ( $a$  порядка 0.1) и *релятивистском* ( $a$  порядка и более 1) режимах. Передовые лазерные технологии позволяют надеяться на скорое осуществление подобных экспериментов в *ультрарелятивистском* ( $a \gg 1$ ) режиме.

Взаимодействие мощных сверхкоротких лазерных импульсов с плазмой, формирующейся на поверхности конденсированных мишеней, является в настоящее время предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований, направленных на изучение свойств вещества в экстремальном состоянии и создание эффективных компактных источников высокоэнергетичных – быстрых – частиц и сверхкоротких рентгеновских импульсов. Взаимодействие интенсивного ультракороткого высококонтрастного лазерного импульса с критической плазмой, индуцированной передним фронтом импульса и обладающей резким профилем плотности, приводит к формированию наиболее коротких импульсов рентгеновского излучения (как когерентного, так и некогерентного) и ионов с наибольшими энергиями.

Лазерно-плазменная генерация быстрых частиц открывает оптике пути в традиционные прикладные сферы ядерной науки и физики высоких энергий, наиболее актуальной из которых является терапия раковых заболеваний с использованием пучков быстрых протонов. Формирование высокоэнергетичных электронов в лазерно-индуцированной плазме является важнейшим элементом технологии быстрого поджига инерциального термоядерного синтеза. Успех этих и многих других приложений во многом зависит от понимания механизмов разогрева частиц в закритической плазме с резкой границей. Очень важен вопрос о направлении распространения быстрых электронов и ионов и их пространственных распределениях. Движение быстрых электронов у поверхности и внутри мишени порождает различные как коллективные когерентные (возникновение амбиполярного поля, генерация гармоник высокого порядка), так и столкновительные некогерентные (тормозное излучение рентгеновских волн) явления.

В субрелятивистском режиме взаимодействия света с приповерхностной плазмой существеннейшим препятствием для формирования и разогрева быстрых электронов является низкая эффективность поглощения света в плотной высокотемпературной плазме. При интенсивностях лазерного импульса свыше  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> (но ниже  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) большая часть энергии падающего излучения отражается от плотной плазмы. Для повышения эффективности поглощения применяют тонкие пленки, а также мишени различного атомного состава и различной объемной и поверхностной структуры. Увеличение эффективности разогрева плазмы можно обеспечить путем модификации приповерхностного слоя плотной мишени. В экспериментах по облучению мишеней из высокопористого кремния [6-8] было зарегистрировано существенное повышение эффективности генерации жесткого некогерентного рентгеновского излучения по сравнению с однородными мишенями. Теоретическое объяснение увеличения эффективности поглощения субрелятивистских фемтосекундных лазерных импульсов в высокопористых мишенях необходимо для целого ряда практических приложений, а также представляет самостоятельный интерес для исследования механизмов поглощения света в плазме твердотельной плотности.

Получение аттосекундных (с длительностью в диапазоне  $10^{-18}$ – $10^{-15}$  с) импульсов (АИ) электромагнитного излучения – одна из актуальных задач лазерной физики и нелинейной оптики [9]. Объект пристального внимания фундаментальной науки, АИ представляют значительный интерес как наиболее чувствительный инструмент диагностики сверхбыстрых процессов [10], позволяющий исследовать динамику электронов в атомах и молекулах с субнанометровым и субфемтосекундным разрешением. К настоящему времени, теоретически проанализированы и экспериментально реализованы методы получения АИ, основанные на генерации когерентного коротковолнового излучения при ионизации и

последующей рекомбинации атомов в интенсивных лазерных пучках [11,12]. В эксперименте получены как цуги АИ [13], так и одиночные аттосекундные вспышки электромагнитного излучения [11,14]. К сожалению, эффективность генерации коротковолнового излучения атомами ограничена и очень мала даже при обеспечении условий фазового согласования. В связи с созданием лазерных систем, генерирующих поля с интенсивностью вплоть до  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup> [1], особенно актуальным становится иной путь получения широкого спектра когерентного излучения (и, тем самым, короткого импульса), обеспечивающий высокую эффективность нелинейно-оптического преобразования, -- нелинейное взаимодействие сверхсильного светового поля с закритической плазмой [15].

Аналитическое описание взаимодействия сверхкоротких лазерных импульсов с плотной, в том числе пространственно неоднородной плазмой чрезвычайно сложно и до сих пор не проводилось, в то же время эффективными в данном контексте являются методы численного моделирования. В настоящей работе проведены численные исследования взаимодействия мощных сверхкоротких световых импульсов с плазмой, образующейся на поверхности конденсированных, в том числе нанопористых, мишеней и в тонких пленках. Для этого применялся метод частиц в ячейках (particle-in-cell) [16-20], усовершенствованный с целью учета кулоновских столкновений между частицами, что особенно важно в режиме субрелятивистских интенсивностей света.

1. G.A. Mourou, T. Tajima, S.V. Bulanov, *Optics in the relativistic regime*, Rev. Mod. Phys. 78, 309 (2006)
2. N. Ishii, L. Turi, VS Yakovlev, T. Fuji, F. Krausz, A. Baltuška, R. Butkus, G. Veitas, V. Smilgevicius, R. Danielius, A. Piskarskas, *Multimillijoule Chirped Parametric Amplification of Few Cycle Pulses*, Opt.Lett. 30, 567(2005)
3. В.В. Ложкарев, С.Г. Гаранин, Р.Р. Герке, В.Н. Гинзбург, Е.В. Катин, А.В. Кирсанов, Г.А. Лучинин, А.Н. Мальшаков, М.А. Мартьянов, О.В. Палашов, А.К. Потемкин, Н.Н. Рукавишников, А.М. Сергеев, С.А. Сухарев, Е.А. Хазанов, Г.И. Фрейдман, А.В. Чарухчев, А.А. Шайкин, И.В. Яковлев, *100-тераваттный фемтосекундный лазер на основе параметрического усиления*, Письма в ЖЭТФ, 82,196 (2005),
4. H. Kiriya, N. Inoue, Y. Akahane, K.Yamakawa, *Prepulse-free, multi-terawatt, sub-30-fs laser system*, Opt. Express, 14, 438 (2006)
5. S.-W. Bahk, P. Rousseau, T. A. Planchon, V. Chvykov, G. Kalintchenko, A. Maksimchuk, G. A. Mourou, V. Yanovsky, *Generation and characterization of the highest laser intensities ( $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>)*, Opt. Lett., 29, 2837(2004)
6. Р.В. Волков, В.М. Гордиенко, М.С. Джиджоев, Б.В. Каменев, П.К. Кашкаров, Ю.В. Пономарев, А.Б. Савельев, В.Ю. Тимошенко, А.А. Шашков, *Генерация жесткого рентгеновского излучения при облучении пористого кремния сверхинтенсивными фемтосекундными лазерными импульсами*, Квантовая электроника, 25, 3 (1998).
7. T. Nishikawa, H. Nakano, N. Uesugi, M. Nakao, H. Masuda, *Greatly Enhanced Soft X-Ray Generation from Femtosecond-Laser-Produced Plasma by Using a Nanohole-Alumina Target*, Appl. Phys. Lett., 75, p. 4079(1999)
8. T. Nishikawa, H. Nakano, K. Oguri, N. Uesugi, M. Nakao, K. Nishio, H. Masuda, *Nanocylinder-array Structure Greatly Increases the Soft X-Ray Intensity Generated from Femtosecond-Laser-Produced Plasma*, Appl. Phys. B, 73, 185 (2001).
9. P. Agostini, L.F. DiMauro, *The physics of attosecond light pulses*, Rep.Prog.Phys. 67, 813 (2004)

10. M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz, *Attosecond metrology*, Nature 414, 509 (2001)
11. M. Drescher, M. Hentschel, R. Kienberger, M. Uiberacker, V. Yakovlev, A. Scrinzi, U. Kleineberg, U. Heinzmann, and F. Krausz, *Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy*, Nature 419, 803 (2002)
12. Y. Mairesse, A. de Bohan, L. J. Frasinski, H. Merdji, L.C. Dinu, P. Monchicourt, P. Breger, M. Kovačev, B. Carre, H.G. Muller, P. Agostini, P. Salieres, *Attosecond Synchronisation of High-Harmonic Soft X-Rays*, Science; 302, 1540 (2003)
13. P.M. Paul, E.S. Toma, P. Breger, G. Mullot, F. Auge, Ph. Balcou, H.G. Muller, P. Agostini, *Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation*, Science 292 1689 (2001)
14. Y. Mairesse, F. Quere, *Frequency-Resolved Optical Gating for Complete Reconstruction of Attosecond Bursts*, Phys. Rev. A 71, 011401(R) (2005)
15. P. Gibbon, *Harmonic generation by femtosecond laser-solid interaction: A coherent water-window light source?*, Phys. Rev. Lett. **76**, 50 (1996)
16. Ч. Бэдсел, А. Лэнгдон, Физика плазмы и численное моделирование: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 452с.; Charles K. Birdsall, A. Bruce Langdon, Plasma physics via computer simulation. -- New York: McGraw-Hill, 1985.
17. Р. Хокни, Дж. Иствуд, Численное моделирование методом частиц: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 638 с.; R.W. Hockney, J.W. Eastwood, Computer simulation using particles. -- New York: McGraw-Hill, 1981.
18. Ю.Н. Григорьев, В.А. Вшивков, М.П. Федорук, Численное моделирование методами частиц-в-ячейках. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 360с.
19. A. Pukhov, *Strong field interaction of laser radiation*, Rep.Prog.Phys.66, 47(2003)
20. J.P. Verboncoeur, *Particle simulation of plasmas: review and advances*, Plasma Phys. Control. Fusion, 47, 231(2005)

## Цели работы:

1. Исследование генерации быстрых электронов при облучении плотных сред фемтосекундными импульсами в субрелятивистском и релятивистском режимах взаимодействия. Изучение пространственных распределений электронов, генерируемых в приповерхностной плотной плазме фемтосекундными импульсами субрелятивистской и релятивистской интенсивности. Исследование влияния жесткой фокусировки пучка на генерацию быстрых электронов.
2. Исследование поглощения короткого светового импульса в плазме твердотельной плотности и влияния пористой структуры мишени на эффективность ее разогрева в субрелятивистском режиме взаимодействия. Оценка вкладов различных механизмов разогрева электронов плазмы и поиск новых механизмов.
3. Исследование возможности получения изолированных (во времени) аттосекундных рентгеновских импульсов при взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса релятивистской интенсивности с тонким плазменным слоем твердотельной плотности. Изучение возможности генерации одиночных АИ в плосковолновой геометрии и в режиме жесткой фокусировки лазерного излучения.

## Научная новизна

1. Предложена схема генерации аттосекундных рентгеновских импульсов при воздействии сверхкоротким высокоинтенсивным лазерным импульсом на плотную плазму с резким профилем плотности. Показано, что скачкообразное разрушение плазменного слоя в процессе взаимодействия сверхкороткого ультрарелятивистского лазерного импульса с тонкой (по сравнению с длиной волны света) свободновисящей пленкой обуславливает возможность эффективной генерации одиночных аттосекундных рентгеновских импульсов как в плосковолновой геометрии, так и в режиме жесткой фокусировки лазерного излучения.

2. Продемонстрировано увеличение эффективности поглощения света в высокотемпературной плотной плазме с наномасштабными неоднородностями по сравнению с эффективностью поглощения света в плоской мишени. Показано, что ключевую роль в возрастании температуры и количества «быстрых» электронов играет рост эффективной частоты необратимых процессов взаимодействия быстрых электронов с неоднородным электромагнитным полем вблизи неоднородностей, т.е. увеличение частоты столкновений электронов с поверхностью вещества.

3. Впервые исследован механизм двухфотонного резонансного поглощения энергии релятивистского лазерного импульса в закритической плазме при нормальном падении. Обнаружено, что с увеличением интенсивности диапазон плотностей плазмы, при которых поглощение эффективно, расширяется и смещается в область более высоких плотностей.

4. Исследованы пространственные распределения быстрых электронов, генерируемых в приповерхностной плотной плазме фемтосекундными импульсами субрелятивистской и релятивистской интенсивности. Продемонстрирована генерация коллимированного пучка быстрых электронов, распространяющегося вдоль направления отражения света.

## Практическая ценность

1. Развита методы численного моделирования взаимодействия сверхинтенсивного лазерного излучения с приповерхностной плазмой твердотельной плотности, в том числе пространственно неоднородной.
2. Предложена схема генерации одиночного аттосекундного рентгеновского импульса при воздействии интенсивным высококонтрастным лазерным импульсом на тонкую пленку. Показано, что при правильной постановке эксперимента в этом случае могут быть получены АИ с длительностями порядка десяти аттосекунд.

3. Продемонстрирована перспективность использования нанопористых мишеней для увеличения эффективности разогрева плазмы твердотельной плотности.

Разработанные алгоритмы и компьютерные программы двумерного численного моделирования взаимодействия лазерных импульсов с приповерхностной плазмой методом частиц в ячейке могут быть использованы для исследования генерации быстрых частиц и коротких рентгеновских импульсов когерентного излучения при взаимодействии интенсивных лазерных пучков и импульсов с конденсированными средами.

Результаты проведенных расчетов могут быть использованы для оптимизации параметров эксперимента по взаимодействию сверхинтенсивного лазерного излучения с твердыми, в том числе наноструктурированными, мишенями и тонкими пленками.

### **Личный вклад автора**

Результаты диссертационной работы получены автором лично. Автором разработан способ моделирования взаимодействия сверхинтенсивного лазерного излучения с приповерхностной плазмой твердотельной плотности (в том числе пространственно неоднородной) на основе метода частиц в ячейках. Автором проводились все расчеты, изложенные в оригинальных главах диссертации, и осуществлялась интерпретация полученных результатов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Эффективность поглощения субрелятивистских световых импульсов с длительностью порядка ста фемтосекунд в высокотемпературной плазме, образующейся на поверхности нанопористых мишеней, значительно (по крайней мере, вдвое) превосходит эффективность поглощения в плазме, образующейся на поверхности однородной мишени. Присутствие наномасштабных неоднородностей (обусловленных наличием пор в мишени) в приповерхностной плазме, облучаемой фемтосекундным импульсом, приводит к росту количества «быстрых» электронов, существенному повышению их средней энергии и незначительному увеличению средней энергии «тепловых» электронов.

2. В плазме, образованной субрелятивистским фемтосекундным лазерным импульсом на поверхности однородной мишени, «быстрые» электроны в основном находятся в области короны, а их распределение по энергиям сильно анизотропно, в то время как «тепловые» электроны находятся в области высокой плотности и их распределение по энергиям почти изотропно. В плазме с наномасштабными



неоднородностями в области высокой плотности присутствуют как «тепловые», так и «быстрые» электроны, их распределения по энергиям почти изотропны.

3. При наклонном падении фемтосекундного импульса с релятивистской интенсивностью на закритическую плазму с резкой границей формируется пучок «быстрых» электронов, распространяющийся вдоль направления отражения света.

4. При нормальном падении лазерного импульса релятивистской интенсивности на плазму с плотностью около четырех критических доминирующим механизмом генерации быстрых электронов является возбуждение электронных плазменных волн на удвоенной частоте поля. Зависимость коэффициента поглощения от плотности плазмы носит резонансный характер. С увеличением интенсивности резонанс смещается в область более высоких плотностей, а его ширина растет.

5. При облучении тонкого (по сравнению с длиной волны света) плазменного слоя твердотельной плотности сверхкоротким ультрарелятивистским лазерным импульсом имеют место быстрые квазипериодические движения частиц плазмы, которые приводят к генерации когерентного коротковолнового излучения с широким спектром, содержащим сплошные участки. Выделение ограниченных участков в спектрах как отраженного, так и прошедшего сквозь плазменный слой света с помощью полосового фильтра позволяет получать интенсивные одиночные электромагнитные импульсы аттосекундной длительности (вплоть до нескольких аттосекунд).

### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты исследований, представленных в диссертации, докладывались автором на следующих общероссийских и международных научных конференциях:

Вторая международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2001» (Санкт-Петербург, Россия, 2001), международная конференция по когерентной и нелинейной оптике ICONO 2005 (Санкт-Петербург, Россия, 2005), международный симпозиум по актуальным проблемам нелинейной волновой физики NWP-2003 (Нижний Новгород, Россия, 2005), международный симпозиум по актуальным проблемам нелинейной волновой физики NWP-2005 (Санкт-Петербург - Нижний Новгород, Россия, 2005), 4-ый итало-российский симпозиум по проблемам лазерной физики и технологий ITARUS 2001 (Санкт-Петербург, Россия, 2001), 5-ый итало-российский симпозиум по проблемам лазерной физики и технологий ITARUS 2003 (Москва, Россия, 2003), 12-ый международный симпозиум по лазерной физике LPHYS'2003 (Гамбург, Германия, 2003), 13-ый международный симпозиум по лазерной физике LPHYS'2004 (Триест, Италия, 2004), XXXII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, (Россия, Звенигород, 2005), 14-ый международный симпозиум по лазерной физике LPHYS'2005 (Киото, Япония, 2005), Третья международная

конференция по сверхсильным полям в плазме (Варенна, Италия, 2005), 15-ый международный симпозиум по лазерной физике LPHYS'2006 (Лозанна, Швейцария, 2006).

Кроме того, результаты работы неоднократно докладывались на семинаре по физике многофотонных процессов Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН и на семинаре Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

По материалам диссертации опубликовано пятнадцать печатных работ: две статьи в реферируемых журналах «Письма в ЖЭТФ» и «Квантовая электроника» и тринадцать публикаций в сборниках трудов конференций. Список публикаций автора приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, четырех приложений и библиографии. Объем работы составляет 118 страниц, включая 43 рисунка. Библиография содержит 116 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** обсуждается практическая и научная значимость и актуальность темы диссертации, формулируются цели работы и основные положения, выносимые на защиту. Поясняется структура дальнейшего изложения материала работы.

В **первой главе** формулируется подход к теоретическому исследованию взаимодействия сверхинтенсивного лазерного излучения с веществом, используемый в настоящей работе, – численное моделирование на основе метода частиц в ячейках. В **разделе 1.1.** представлен общий обзор методов компьютерного моделирования взаимодействия лазерных импульсов с плазмой. Обосновывается целесообразность применения метода частиц в ячейках, обсуждаются его основные принципы, преимущества и недостатки. Обсуждается вопрос о моделировании столкновений частиц. В **разделе 1.2.** обсуждается численная реализация модели, способы численного интегрирования уравнений Максвелла и уравнений движения релятивистских частиц и методика моделирования кулоновских столкновений. В **разделе 1.3.** анализируется надежность и точность проведенных расчетов и достоверность результатов моделирования.

**Вторая глава** посвящена исследованию пространственных распределений быстрых электронов, генерируемых в приповерхностной плотной плазме, облучаемой фемтосекундными лазерными импульсами с субрелятивистской и релятивистской интенсивностью. Вводный **раздел 2.1.** посвящен описанию формирования плотной

приповерхностной плазмы и механизмов поглощения энергии короткого лазерного импульса в плотной плазме с резким профилем плотности. **Раздел 2.2.** посвящен постановке задачи и описанию особенностей используемой численной модели. В **разделе 2.3.** изучаются пространственные распределения электронов, генерируемых в приповерхностной плотной плазме под воздействием фемтосекундных импульсов. Показано, что при наклонном падении короткого релятивистского импульса быстрые электроны в основном вылетают в телесный угол между нормалью к поверхности и направлением отражения импульса. Кроме того, наблюдается направленная эмиссия быстрых электронов с наибольшими энергиями вдоль направления отражения импульса (рис.1). Быстрые электроны, распространяющиеся по направлению отражения импульса, образуют коллимированный пучок с углом разлета не более 5 градусов.

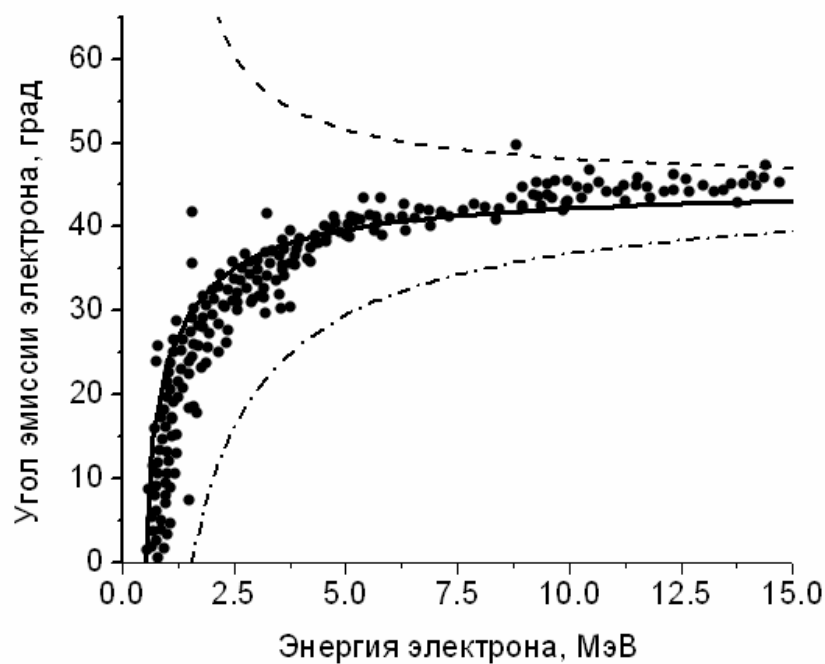


Рис.1. Зависимость угла эмиссии электронов от их энергии после взаимодействия лазерного импульса (длительность - 30 фс, угол падения света - 45°,  $\lambda = 0.6$  мкм,  $I = 2 \cdot 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $p$ -поляризация) с плотной плазмой (плотность -  $15n_c$ , где  $n_c$  – критическая плотность). Точками обозначены результаты численного моделирования, кривые отображают оценочные аналитические зависимости [Z.-M. Sheng et. al., Phys. Rev. Lett. 85, 5340 (2000)].

В **разделе 2.4.** исследуется влияние жесткой фокусировки лазерного пучка на генерацию быстрых электронов. **Раздел 2.5.** посвящен механизму резонансного поглощения энергии релятивистских импульсов при нормальном падении. Показано, что вблизи области двухфотонного резонанса часть энергии лазерного излучения преобразуется в энергию плазменных волн, а затем, вследствие их затухания, в тепловую энергию частиц. Продемонстрировано, что зависимость коэффициента поглощения от плотности плазмы носит резонансный характер (рис.2).

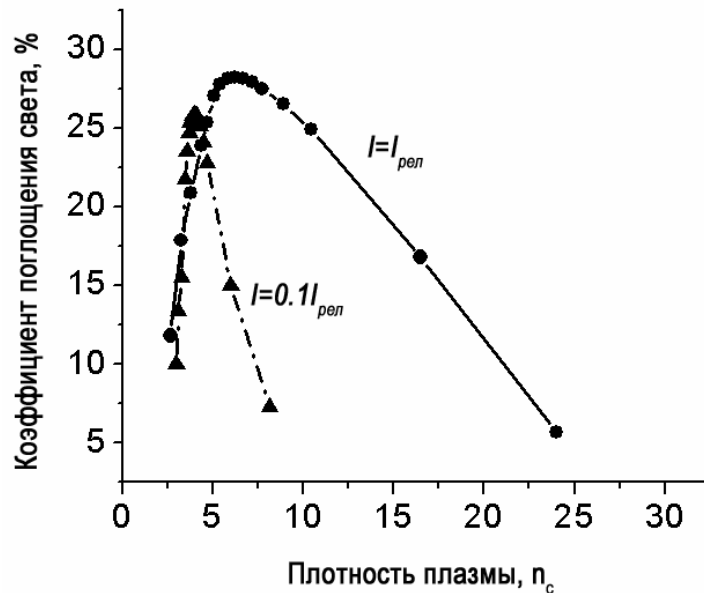


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения от плотности плазмы (в единицах критической плотности  $n_c$ ) для двух значений интенсивности света, указанных на рисунке.

В **третьей главе** обсуждаются результаты расчета взаимодействия фемтосекундных (50 -- 200 фс) световых импульсов субрелятивистской интенсивности (в диапазоне  $10^{16}$  --  $5 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>) с плотной плазмой, образующейся на поверхности наноструктурированных мишеней. **Введение** к третьей главе включает обсуждение соответствующих экспериментальных результатов. В **разделе 3.1.** формулируется постановка задачи, описываются особенности моделирования плазмы с наномасштабными неоднородностями. В **разделе 3.2.** продемонстрировано увеличение эффективности поглощения света в высокотемпературной плотной плазме за счет модификации поверхностного слоя твердотельной мишени. Показано, что наличие наномасштабных пространственных неоднородностей существенно влияет на характер разогрева электронов и ионов плазмы: средняя энергия «быстрых» электронов и их количество возрастают при переходе от сплошной мишени к наноструктурированной сильнее, чем средняя энергия «тепловых» электронов (рис. 3). В **разделе 3.3.** рассматриваются физические механизмы нагрева электронов в плазме с наномасштабными неоднородностями, выявленные в результате численного исследования динамики электронов. Прослеживается движение нескольких электронов в тонком слое вблизи поверхности мишени в процессе взаимодействия с фемтосекундным импульсом, исследуется поведение электронов в неоднородном электромагнитном поле на границах «вещество – пора». Показано, что увеличение эффективности нагрева фемтосекундной лазерной плазмы и генерации горячих частиц в случае использования наноструктурированных мишеней объясняется понижением средней плотности плазмы, ее тепло- и электропроводности, а также значительным увеличением площади поверхности «плазма--вакуум».

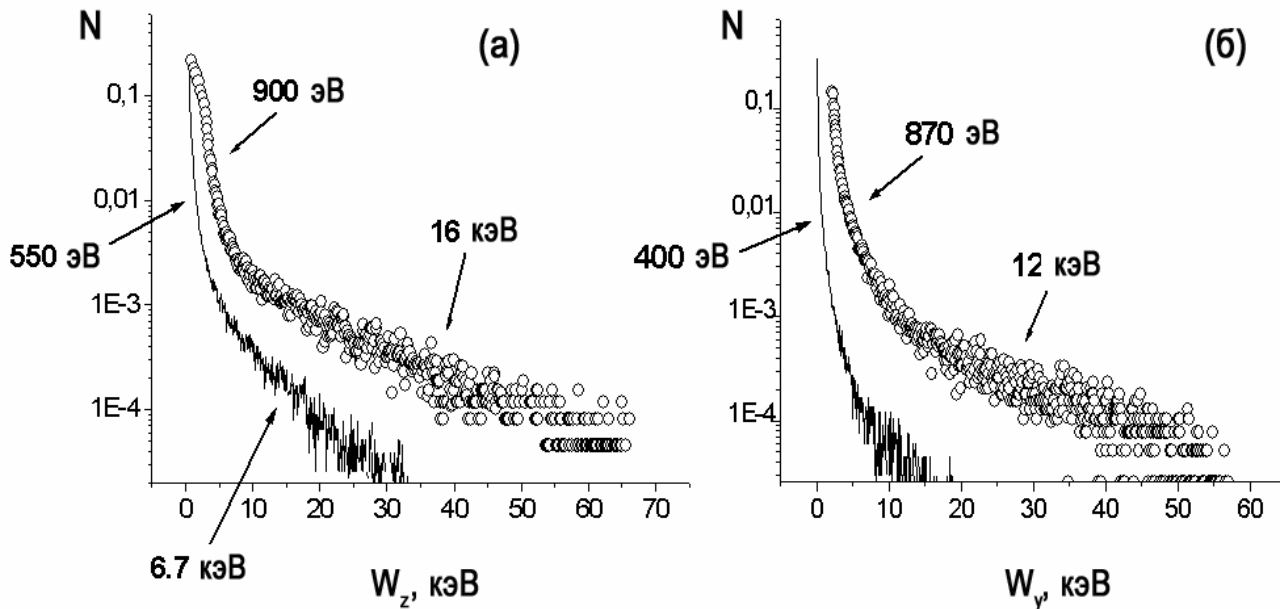


Рис. 3. (а) Распределение электронов по энергии  $W_z$  движения вдоль нормали к поверхности пористой мишени (кружки); (б) распределение электронов по энергии  $W_y$  движения вдоль поверхности пористой мишени (кружки). Локальная плотность мишени  $90 n_c$ , размеры неоднородностей  $\sim 40$  нм, параметры лазерного импульса: длительность - 200 фс,  $\lambda = 0.6$  мкм,  $I = 2 \cdot 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $p$ -поляризация. Сплошными кривыми показаны распределения электронов в однородной плазме при тех же параметрах импульса. Число электронов  $N$  нормировано на полное количество электронов. Стрелками указаны эффективные температуры электронов на разных участках распределений.

Ключевую роль в возрастании температуры и количества горячих электронов играет рост эффективной частоты необратимых процессов взаимодействия быстрых электронов с неоднородным электромагнитным полем вблизи границы пор (т.е. увеличение частоты столкновений электронов с поверхностью вещества).

В четвертой главе обсуждается возможность эффективной генерации одиночного аттосекундного импульса рентгеновского излучения при взаимодействии сверхкороткого (длительность по полувысоте около 7 фс) лазерного импульса ультрарелятивистской интенсивности ( $I \propto 10^{21}$  Вт/см<sup>2</sup>) с тонким плазменным слоем твердотельной плотности. В разделе 4.1. обсуждается постановка задачи и особенности используемой численной модели. В разделе 4.2. показано, что параметром, определяющим характер процессов при взаимодействии ультрарелятивистского импульса с плазменным слоем при заданных значениях плотности и толщины слоя, является критическая интенсивность, определяемая соотношением

$$I_c = I_{\text{рел}} \left( \frac{\pi l}{\lambda} \cdot \frac{n}{n_c} \right)^2,$$

где  $l, n$  – толщина и плотность слоя,  $\lambda$  – длина волны света.

С помощью численных расчетов продемонстрировано, что при интенсивности лазерного импульса около критической, оказывается возможным получать одиночные АИ в отраженном или прошедшем сквозь слой свете, выделяя ограниченные участки в спектрах

отраженного или прошедшего света (на рис.4 представлен пример выделения одиночного АИ в отраженном свете).

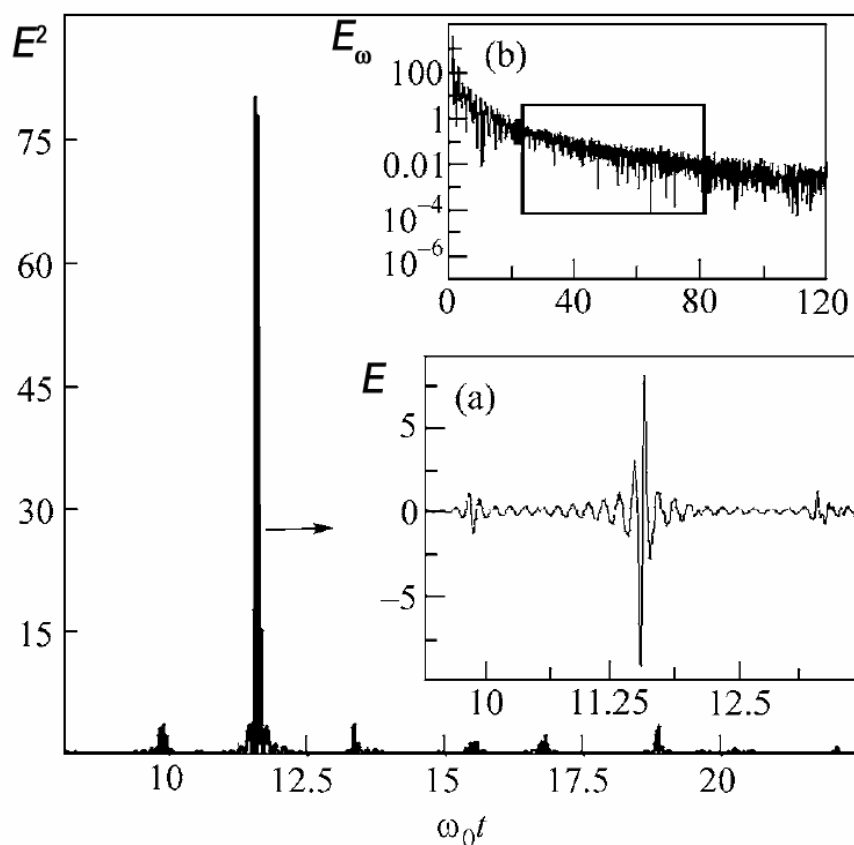


Рис.4. Временная зависимость квадрата напряженности отраженного поля после спектральной фильтрации. Интенсивность возбуждающего света  $I=1900 \cdot I_{\text{рел}}$ , плотность плазмы - 250 пс, толщина слоя -  $\lambda/20$ . На вставке (а) - поле выделенного АИ ; на вставке (b) - спектр отраженного света (рамкой выделена область фильтрации). Поле измеряется в единицах  $mc\omega_0/e$ , время - в безразмерных единицах  $\omega_0 t$ , где  $\omega_0$  – несущая частота поля.

При интенсивностях света на порядок меньше критической, в прошедшем свете возможна генерация одиночных АИ с частотами, в сотни раз превышающими лазерную (рис. 5).

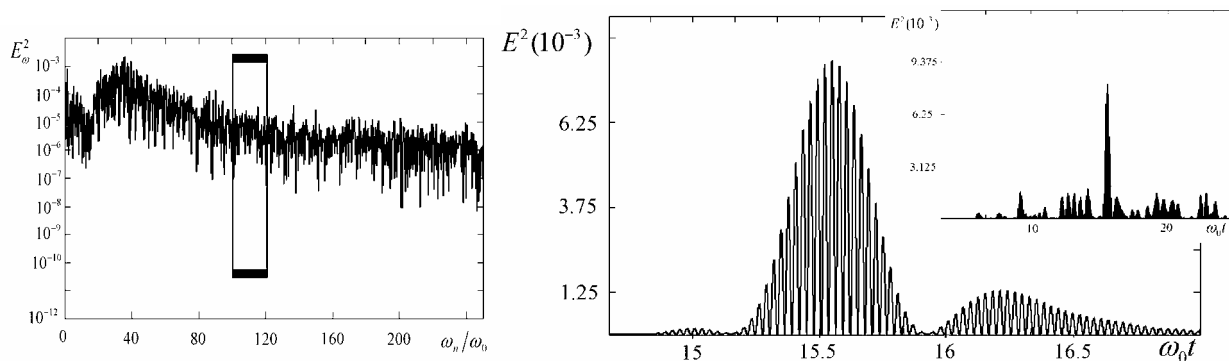


Рис. 5 (а) Спектр прошедшего излучения при интенсивности падающего света  $I=600 \cdot I_{\text{рел}}$ , плотности плазмы 300 пс и толщине слоя  $\lambda/10$ , рамкой выделена область фильтрации от 100 до 120; (b) поле выделенного АИ (на вставке -- квадрат поля после фильтрации в зависимости от времени).

**Раздел 4.3.** посвящен исследованию возможности генерации одиночного АИ в режиме жесткой фокусировки лазерного пучка. В этом случае пленка изгибается под действием

света, возникают сильные дифракционные эффекты (эволюция плотности электронов и ионов при облучении плазменного слоя импульсом показана на рис. 6). Тем не менее, численные расчеты показывают, что и в случае жесткой фокусировки с помощью спектральной фильтрации отраженного излучения может быть выделен одиночный аттосекундный импульс.

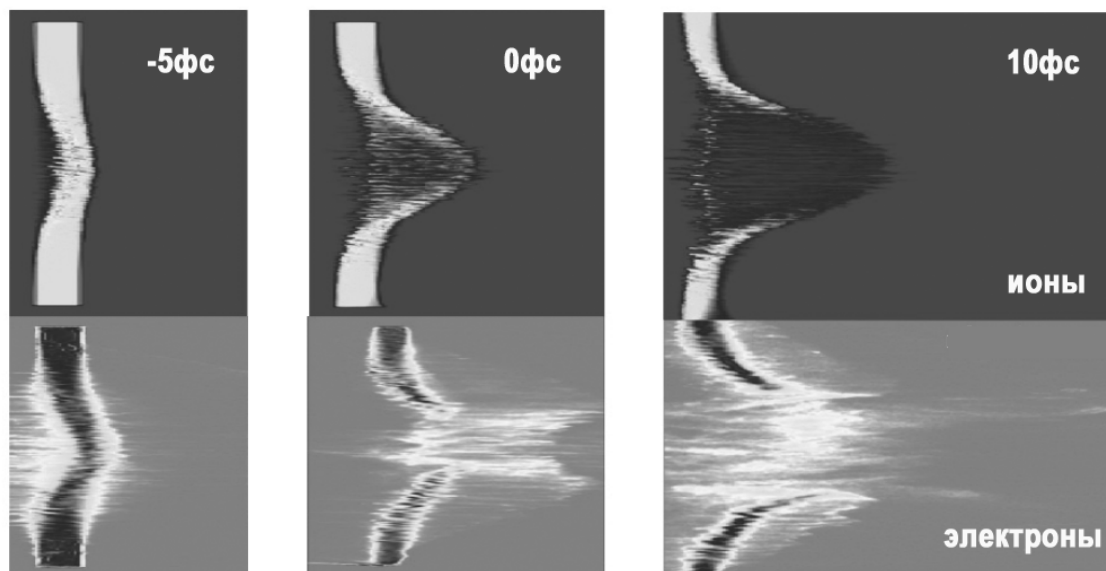


Рис. 6. Распределения плотности ионов и электронов в процессе прохождения лазерного импульса с интенсивностью  $I=1700 \cdot I_{\text{рел}}$  и длительностью через плазменный слой с начальной плотностью  $250 \text{ нс}$  и толщиной  $\lambda/20$  в указанные моменты времени. Момент времени  $0 \text{ фс}$  соответствует моменту прихода максимального значения поля в импульсе в точку начального положения поверхности мишени.

В **заключении** формулируются основные результаты настоящей работы. В **приложении 1** содержится краткое изложение истории развития и применения метода частиц в ячейках в моделировании электродинамики лазерной плазмы. В **приложении 2** описана безразмерная система величин, используемая в диссертационной работе. В **приложении 3** приведены конечно-разностные аналоги уравнений Максвелла в одномерном и двумерном случаях. **Приложение 4** посвящено описанию построения поглощающих граничных условий для уравнений Максвелла, используемых в работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

По результатам диссертационной работы могут быть сформулированы следующие выводы:

1. Показано, что эффективность поглощения фемтосекундных ( $50 — 200 \text{ фс}$ ) световых импульсов субрелятивистской интенсивности ( $10^{16} -- 5 \cdot 10^{17} \text{ Вт/см}^2$ ) в плотной плазме, образующейся на поверхности наноструктурированных мишеней с высокой пористостью,

существенно (по крайней мере, вдвое) превосходит эффективность поглощения в плазме плоской однородной мишени. Наличие наномасштабных пространственных неоднородностей существенно влияет на характер разогрева электронов и ионов плазмы; в частности, средняя энергия и количество быстрых электронов при облучении неоднородной плазмы оказываются существенно выше, чем в случае однородной плазмы той же плотности.

2. Показано, что увеличение эффективности нагрева фемтосекундной лазерной плазмы на поверхности наноструктурированных мишеней и генерации быстрых электронов по сравнению с однородной плотной плазмой плоских мишеней обусловлено понижением средней плотности плазмы и значительным увеличением площади поверхности раздела «плазма-вакуум». Ключевую роль в возрастании средней энергии и количества быстрых электронов играет рост эффективной частоты необратимых процессов взаимодействия быстрых электронов с неоднородным электромагнитным полем вблизи границы пор (т.е. увеличение частоты столкновений электронов с поверхностью вещества).

3. Показано, что в плазме, образованной субрелятивистским фемтосекундным лазерным импульсом на поверхности однородной мишени, «быстрые» электроны в основном находятся в области короны, а их распределение по энергиям сильно анизотропно, в то время как «тепловые» электроны находятся в области высокой плотности и их распределение по энергиям почти изотропно. В плазме с наномасштабными неоднородностями в области высокой плотности присутствуют как «тепловые», так и «быстрые» электроны, их распределения по энергиям почти изотропны.

При наклонном падении фемтосекундного импульса релятивистской интенсивности наблюдается также направленная эмиссия быстрых электронов вдоль направления отражения импульса. При нормальном падении жестко сфокусированного (диаметр пучка в перетяжке менее 8 длин волн света) лазерного излучения релятивистской интенсивности на поверхность закритической плазмы максимальная энергия быстрых электронов увеличивается с уменьшением диаметра пучка, что обусловлено наличием продольной составляющей электрического поля в пучке.

При нормальном падении лазерного импульса релятивистской интенсивности доминирующим механизмом генерации быстрых электронов в плотной плазме в условиях пониженной средней плотности является резонансное возбуждение электронных плазменных волн на частотах близких к удвоенной частоте поля, т.е. в области плазмы с плотностью около  $4n_c$ . Резонанс поглощения энергии падающего излучения при этом довольно широк. Например, при интенсивности лазерного импульса  $I = 4 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup> ширина резонанса по полувысоте составляет около пяти критических плотностей. С увеличением интенсивности резонансная кривая уширяется и сдвигается в область более высоких плотностей плазмы.



4. Показано, что при взаимодействии сверхкороткого релятивистского лазерного импульса с тонкой (по сравнению с длиной волны света) свободновисящей пленкой возможна эффективная генерация одиночных аттосекундных рентгеновских импульсов как в плосковолновой геометрии, так и в режиме жесткой фокусировки лазерного излучения. Быстрые неперiodичные движения частиц тонкого плазменного слоя в течение взаимодействия с предельно коротким ультрарелятивистским лазерным импульсом приводят к формированию широкого, частично сплошного спектра когерентного излучения. Выделение ограниченных участков в спектрах как отраженного, так и прошедшего сквозь слой света с помощью полосового фильтра позволяет получать интенсивные одиночные электромагнитные импульсы аттосекундной длительности (вплоть до нескольких аттосекунд). На оси времени одиночный АИ строго привязан к узлу отраженного (или прошедшего) поля, ближайшему к моменту разрушения пленки. Интенсивность одиночных АИ достигает 1% интенсивности возбуждающего света. При жесткой фокусировке лазерного пучка расходимость АИ, выделенного с помощью фильтрации, определяется ширинами пространственных распределений модулей спектральных амплитуд на частотах внутри окна фильтрации (то есть размером пятна, в котором генерируются высокие частоты), а не распределениями фаз высоких гармоник.

#### **СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Ю.М. Михайлова, В.Т. Платоненко, А.Б. Савельев, Влияние наномасштабных неоднородностей на эффективность нагрева приповерхностной плазмы фемтосекундными лазерными импульсами, *Квантовая электроника*, 2005, том 35, №1, с. 38-42
2. Ю.М. Михайлова, В.Т. Платоненко, С.Г. Рыкованов, Генерация аттосекундного рентгеновского импульса при воздействии сверхкоротким ультрарелятивистским лазерным импульсом на тонкую пленку, *Письма в ЖЭТФ*, 2005, том 81, вып. 11, с. 703-707
3. J.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, Efficient Generation of Attosecond X-Ray Radiation under Interaction of Ultrarelativistic Few-Cycle Laser Pulse with a Thin Foil, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 827. Melville, NY: American Institute of Physics, 2006., p.429-435
4. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, Langmuir Oscillations and Collisionless Absorption of Intense Light in Overdense Plasma, *Fourth Italian-Russian Laser Symposium Technical Digest*, St. Petersburg, July 8 - 12, 2001, Tu-S10-5, pp. 150-152
5. Ю.М. Михайлова, В.Т. Платоненко, Ленгмюровские волны и бесстолкновительное поглощение релятивистского лазерного импульса в закритической плазме, 2 международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2001» (Санкт-Петербург, Россия, 2001), *Сборник тезисов конференции*, с.107

6. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, Plasmas with nanoscale inhomogeneities heated by high-intensity femtosecond laser pulses, Proceedings of the 12th International Laser Physics Workshop, Hamburg, August 25 - 29, 2003, p. 145
7. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, Particle-in-cell simulations of femtosecond pulse – nanoscale inhomogeneous plasma interactions, Topical Problems of Nonlinear Wave Physics, Nizhny Novgorod, September 6 - 12, 2003, p. 210
8. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, Plasma heating with femtosecond laser pulses enhanced by nanoscale inhomogeneities, Fifth Italian-Russian Laser Symposium, Technical Digest, Moscow, October, 2003, Fr-S7-2, p.166
9. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, Fast electrons in dense plasmas exposed to femtosecond pulses of relativistic intensities, Proceedings of the 13th International Laser Physics Workshop, Trieste, July 12 - 16, 2004, p. 84
10. Ю.М. Михайлова, В.Т. Платоненко, С.Г. Рыкованов, Одиночный аттосекундный рентгеновский импульс при взаимодействии ультракоротких релятивистских лазерных импульсов с твердотельной мишенью, Тезисы докладов XXXII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2005, с. 139
11. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, S.G. Rykovanov, Single attosecond X-Ray pulses from solid target irradiated by relativistic-intensity few-cycle laser pulse, Proceedings of the ICONO/LAT 2005, May 11-15, St. Petersburg
12. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, Spatial distributions of hot electrons produced in near-surface overdense plasmas by femtosecond laser pulses of moderate intensities, Proceedings of the ICONO/LAT 2005, May 11-15, St. Petersburg, IWJ5
13. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, Attosecond X-Ray pulse generation in the interaction of few-cycle ultrarelativistic laser pulse with a thin film, Proceedings of the 14th International Laser Physics Workshop, Kyoto, July 4 - 8, 2005
14. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, High-contrast attosecond X-ray pulse generation in the interaction of few-cycle ultrarelativistic laser pulse with a thin film, Topical Problems of Nonlinear Wave Physics, Book of abstracts, Nizhny Novgorod, August 2 - 9, 2005
15. Yu.M. Mikhailova, V.T. Platonenko, Tight focusing effect on the generation of fast electrons and attosecond pulses in the few-cycle laser-foil interaction, Proceedings of the 15th International Laser Physics Workshop, Lausanne, July 24 - 28, 2006, p. 82