

РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ПРЕПЛАЗМЫ НА ФРОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ МИШЕНИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРЕДЫМПУЛЬСОВ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

CALCULATIONS OF PREPLASMA PARAMETERS ON THE FRONT SIDE OF SOLID ALUMINIUM TARGET UNDER DIFFERENT INTENSITY PREPULSES

А. В. Карпеев, И. В. Глазырин, О. Г. Котова, К. С. Назаров, А. В. Потанов, К. В. Сафронов
A. V. Karpeev, I. V. Glazyrin, O. G. Kotova, K. S. Nazarov, A. V. Potanov, K. V. Safronov

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики
им. акад. Е. И. Забабахина, Снежинск
Russian Federal Nuclear Center – E. I. Zababakhin Institute of Technical Physics,

Для планирования и интерпретации результатов экспериментов в схеме лазерного ускорения частиц из тонких твердотельных мишеней на установках ВНИИТФ проводятся численные расчеты такого ускорения. Эффективность схемы ускорения зависит от пространственного распределения плотности плазмы, с которой взаимодействует основной лазерный импульс. Плазма на фронтальной поверхности мишени создается за счет ее абляции под действием предимпульса. Было проведено численное моделирование формирования плазмы. Получены пространственно-временные характеристики предплазмы при различных значениях контраста и формы предимпульса.

Numerical calculations needed for planning and interpretation of particle acceleration experiments from thin solid targets on the laser facilities in VNIITF are performed. Efficiency of the acceleration scheme depends on space distribution of plasma density during the interaction with the main laser pulse. Plasma on the front side of a target is created due to ablation during the prepulse irradiation. Numerical simulations of plasma formation are performed. Space-time characteristics of preplasma are obtained for different contrasts and prepulse parameters.

В РФЯЦ-ВНИИТФ проводятся экспериментальные исследования процессов ускорения высокозарядных ионов при облучении тонких твердотельных мишеней лазерным импульсом (ЛИ) ультракороткой длительности и релятивистской интенсивности на пикосекундной лазерной установке СОКОЛ-П [1] с энергией на мишени до 20 Дж. Для интерпретации результатов таких экспериментов, выявления основных механизмов ускорения и оптимизации толщины облучаемых мишеней проводятся расчеты электродинамическим модулем трехмерной программы ФОКУС [2], разработанной в РФЯЦ-ВНИИТФ.

Результаты этих расчетов дают завышенные оценки параметров пучков, которые слабо согласуются с результатами экспериментов. Одна из причин такого расхождения видится в том, что физика процесса ускорения частиц из тонких твердотельных мишеней чувствительна к состоянию самой мишени в момент прихода основного (рабочего) импульса. Эти изменения в состоянии

мишени происходят под воздействием предимпульсов различной длительности и интенсивности, которые имеются в «выстреле» и могут существенно изменять характер взаимодействия, вплоть до разрушения мишени еще до прихода рабочего импульса. Знание величины и длительности предимпульсов позволяет сделать более корректные численные оценки параметров преплазмы, что в свою очередь позволяет провести более корректные электродинамические расчеты ускорения. Последние позволяют точнее прогнозировать и интерпретировать результаты экспериментов.

В 2012 году в РФЯЦ-ВНИИТФ проведено исследование контраста на установке СОКОЛ-П [3]. Полученное временное распределение пикосекундных предимпульсов в интервале от 0 до 600 псек до прихода рабочего импульса показано на рис. 1. Пунктиром обозначены сигналы, от которых удалось избавиться. Наибольшие пики интенсивности являются плазмообразующими, имеют длительность порядка 1 псек и энергию поряд-

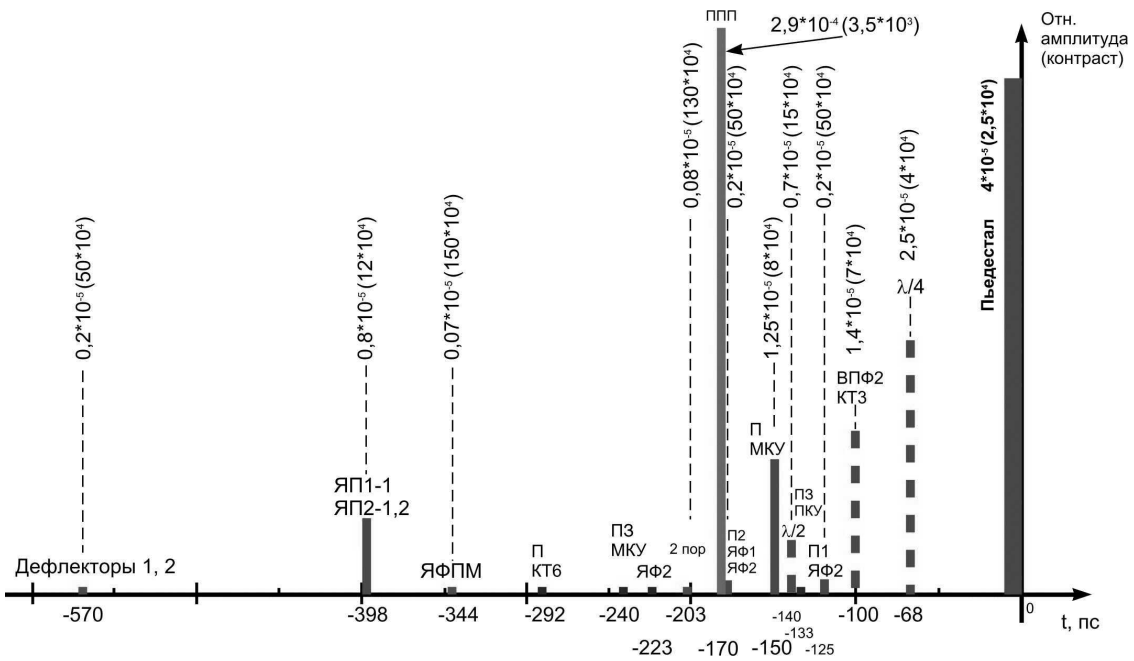


Рис. 1. Временной профиль предимпульса установки СОКОЛ-П [3]

ка 5 мДж. Их влияние необходимо учитывать в расчетах ускорения из тонких мишеней. Отметим, что временной профиль предимпульса не повторяется от импульса к импульсу в точности, поэтому расчеты являются оценочными.

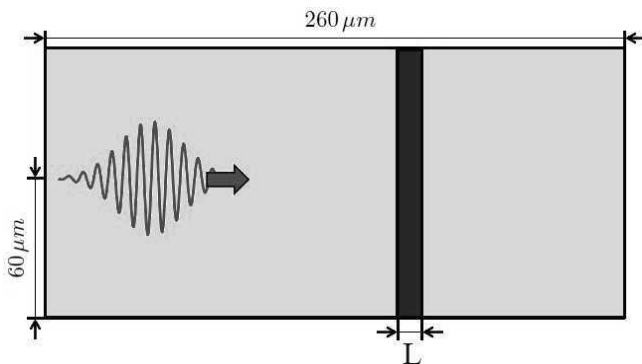


Рис. 2. Схема расчетной области

Расчитывалось облучение плоской алюминиевой фольги плотностью $2,7 \text{ г/см}^3$ и толщиной от 0,1 до 10 мкм – см. рис. 2. Предполагается, что рассматриваемый ЛИ моделирует один из предимпульсов рабочего выстрела на установке СОКОЛ-П, выходная энергия которого 10 Дж. Это определяет его основные параметры: энергия ЛИ изменялась в диапазоне от 10^{-9} Дж до 10^{-3} Дж, что соответствует изменению контраста от $c = 10^{10}$ до $c = 10^4$, длина волны ЛИ $\lambda = 1,053 \text{ мкм}$. ЛИ имел гауссову форму и по времени, с шириной на полувысоте 0.8 псек, и по пространству, с радиусом

пятна фокусировки $r_{fwhm} = 5 \text{ мкм}$. Область, в которую разлетается плазма, заполнена воздухом с начальной плотностью 10^{-6} г/см^3 . Начальная температура всей системы 300 К.

В расчетах учитывалось отличие температур электронов, ионов и фотонов. Электронная теплопроводность описывалась спитцеровским выражением [4]. Для учёта энерговыделения от ЛИ использовалась процедура трассировки лазерных лучей, коэффициент поглощения определялся обратно-тормозным механизмом [5]. Для учёта переноса излучения использовалось многогрупповое диффузионное приближение с табулированными коэффициентами поглощения [6]. Использовались широкодиапазонные уравнения состояния, позволяющие учитывать переход от твердого тела к газовому состоянию с учетом ионизации вещества [4]. Магнитные поля не учитывались.

На рис. 3 представлены результаты расчёта разлёта плазмы при облучении мишени толщиной в 1 мкм ЛИ с энергией в 1 мДж на несколько моментов времени.

На рис. 4 слева приведён профиль плотности преплазмы вдоль оси падающего ЛИ на момент прихода основного импульса (600 псек) для того же расчета. Низкоплотная плазма разлетелась более чем на 80 мкм. Двумерные изолинии поверхностей различных плотностей показывают (см. рис. 4, справа), что только для $0,01 n_c$ (n_c – критическая плотность) изолиния имеет сферическую форму (1-я линия слева), а при плотностях больших критической, явно выражена пространствен-

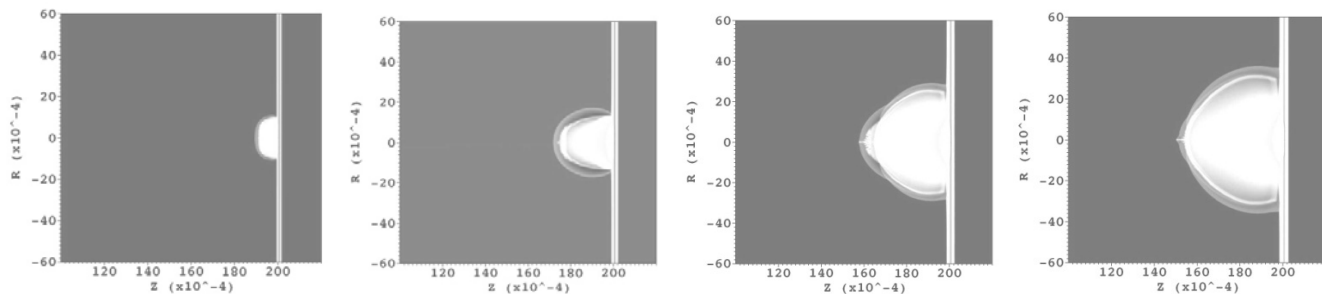


Рис. 3. Характерная динамика разлета мишени. Слева направо – распределения плотности в логарифмическом масштабе на моменты времени 100, 300, 500 и 600 псек

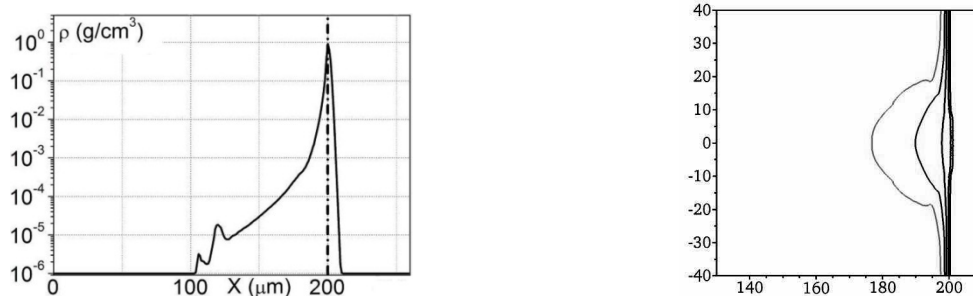


Рис. 4. Профиль вдоль оси симметрии (слева) и изолинии (справа) плотности плазмы для $c = 10^4$ на момент времени 600 псек

ная структура распределения энергии внутри ЛИ. Поверхности, соответствующие плотности выше критической, «продавлены»

Для остальных значений контраста графики подобны, отличаются лишь величины. В табл. 1 представлены численные зависимости радиусов разлета плазмы для изоповерхностей разной плотности при различных значениях контраста. Отношение порогового значения флюенса к предельному для СОКОЛ-П составляет $F_n/F_0 = 6 \cdot 10^{-7}$ [3], т.е. для контрастов начиная с $c = 10^8$ и выше почти не должно быть различий и эти расчеты можно рассматривать как реперные точки для оценки влияния численного метода на описываемые процессы. Именно это и наблюдается на рис. 5 для черного и фиолетового графиков, которые соответствуют контрастам ЛИ $c = 10^8$ и $c = 10^{10}$. При контрасте ЛИ $c = 10^6$ толщина мишени, определяемая по толщине критической плотности, увеличилась в 1,5–2,0 раза, а область преплазмы по $0,01 n_c$ имеет толщину порядка 10 мкм. При контрасте $c = 10^4$ критическая плотность находится на расстоянии около 2 мкм от начальной границы мишени, что дает трехкратное увеличение её оптической толщины. Область преплазмы по $0,01 n_c$ имеет толщину порядка 20 мкм.

Таблица 1

Зависимость радиуса разлета плазмы для изоповерхностей различной плотности в зависимости от контраста. Первое значение – один импульс, второе – два импульса

ρ	$c = 10^4$	$c = 10^6$	$c = 10^8$	$c = 10^{10}$
	Δx , мкм	Δx , мкм	Δx , мкм	Δx , мкм
$0,01 n_c$	21.0 / 22.0	7.5 / 10.0	1.7 / 1.8	1.0 / 1.0
$0,1 n_c$	9.5 / 10.5	2.9 / 2.9	1.0 / 1.1	0.8 / 0.8
n_c	2.1 / 1.9	1.0 / 0.7	0.47 / 0.48	0.44 / 0.44

Для определения влияния многоимпульсового характера облучения мишени на предымпульсе, была проведена серия расчётов, в которых энергия ЛИ была разделена на два одинаковых импульса, которые шли с задержкой в 50 и 250 псек между собой. Получено, что в случае двух импульсов происходит замедление разлета низкоплотной, $n < n_c$, области на начальном этапе, когда энерговклады одно- и двух- импульсного режимов различаются вдвое. Во время действия второго импульса происходит дополнительный прогрев этой области – см. рисунок 6, восходящий участок в скорости разлета при $c = 10^6$ и $c = 10^4$. Второй им-

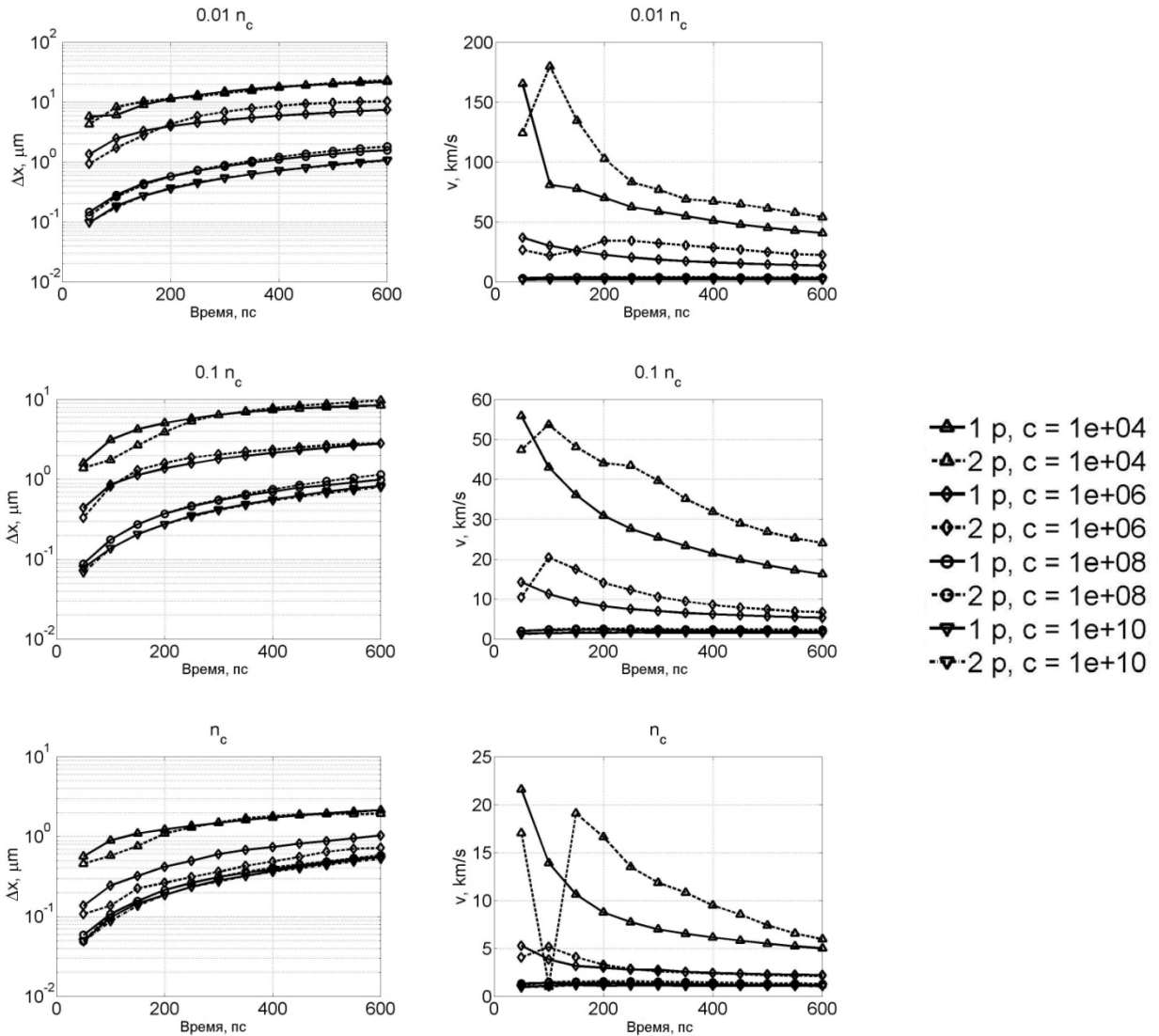


Рис. 5. Зависимость координаты разлёта мишени (слева), соответствующие скорости границы (справа) от времени для различных конфигураций формы и энергии импульса для плотностей $0.01 n_c$ (сверху), $0.1 n_c$ (посередине) и n_c (снизу); 1р – один импульс, 2р – два импульса, c – величина контраста

пульс увеличивает амплитуду тепловой волны и увеличивает радиус разлета низкоплотной области. Для контраста $c = 10^4$ второй импульс формирует волну «сжатия», видимую как торможение на графике скорости для n_c , в результате чего появляется отставание в радиусе разлета, которое нивелируется через 100 псек – красные графики на рисунке 6 внизу слева.

Анализ процессов за поверхностью с критической плотностью показывает, что для $c = 10^8$ и $c = 10^{10}$ наблюдается только тепловое расширение, для $c = 10^6$ слабое влияние энерговыделения на изменение координаты, для плотности $10 n_c$ видны небольшие колебания около $x = 0$ и сжатие

$\Delta x = 0,2 \text{ мкм}$ для 2-х импульсного случая для координаты с плотностью $100 n_c$ – см. рисунок 6. Для контраста $c = 10^6$ видно «продавливание» (выпуклость на тыльной стороне мишени) области мишени за критической плотностью, причем, поскольку в 2-х импульсном случае прогрев больше, то и сжатие мишени немного больше. Расчет с временной задержкой между импульсами 250 псек показал, что происходят всё те же процессы, но с задержкой 200 псек, что соответствует разнице между 250 псек и 50 псек. Расчеты для толщин больше 1 μm не показали принципиального отличия с описанными выше результатами.

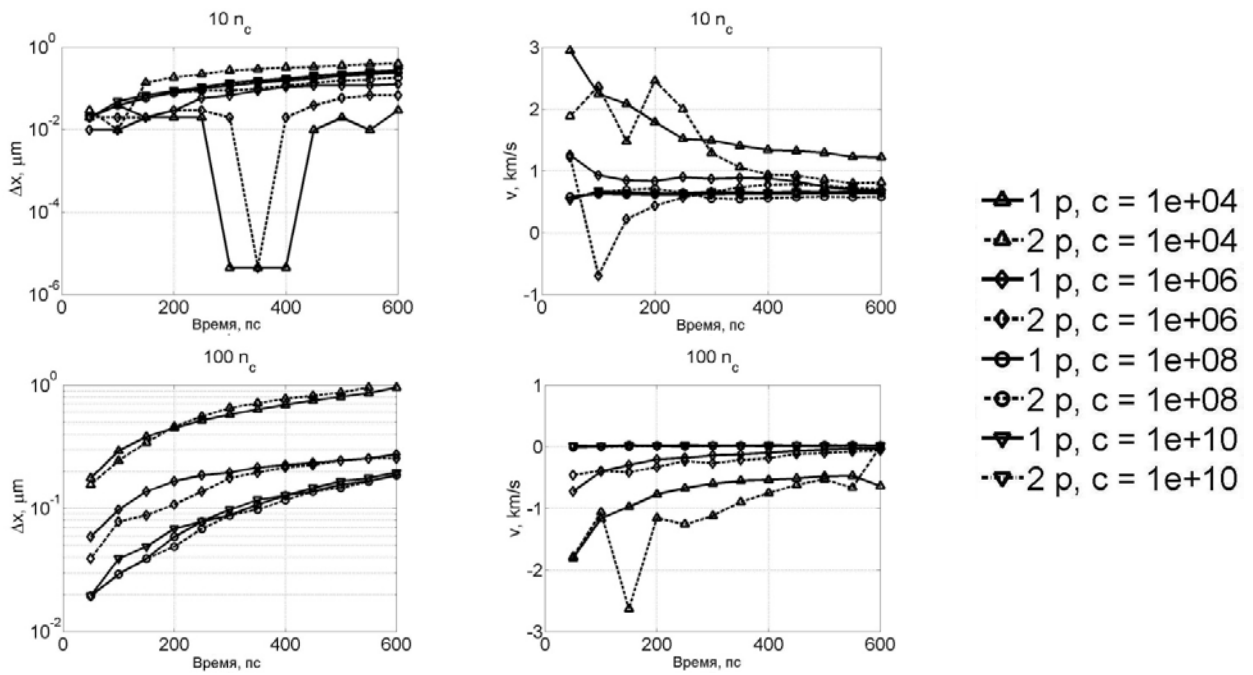


Рис. 6. То же, что на рисунке 5, для плотностей $10 n_c$ (сверху) и $100 n_c$ (снизу)

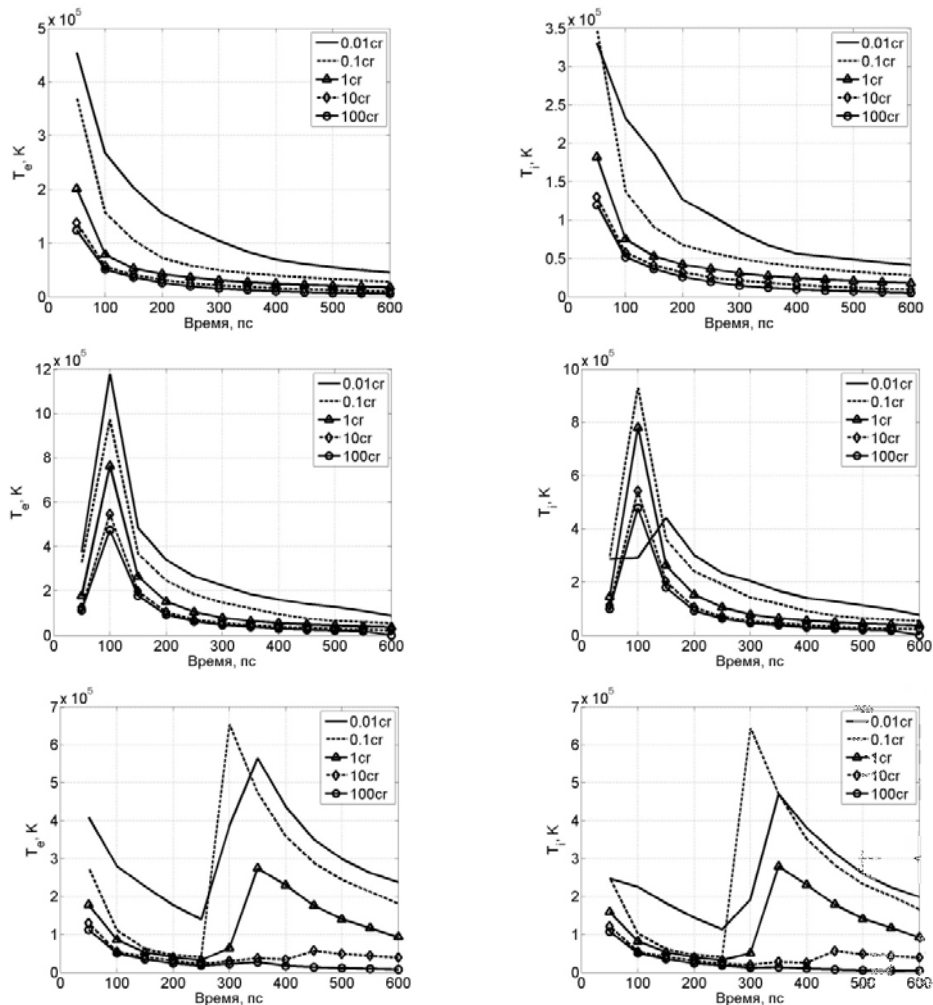


Рис. 7. Зависимость температуры электронов (слева) и ионов (справа), от времени для поверхностей различной плотности в расчетах с одним импульсом (сверху) и с двумя импульсами (посередине и снизу). Задержка между импульсами равна 50 и 250 псек соответственно

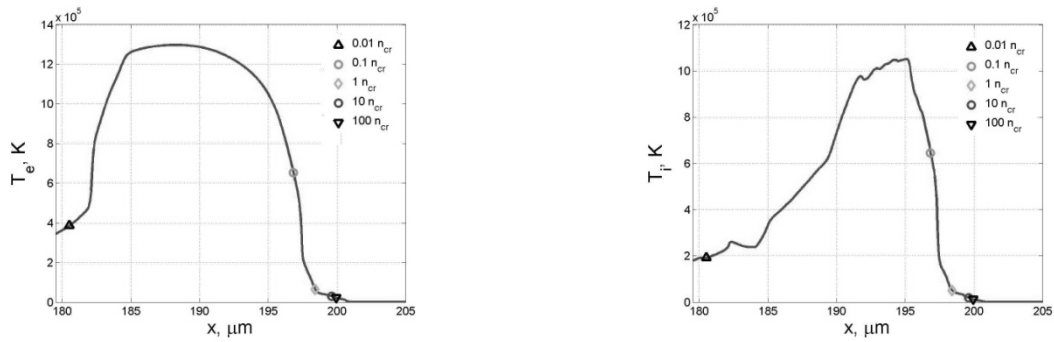


Рис. 8. Распределение температуры электронов (слева) и ионов (справа) в зависимости от координат с различными плотностями в расчете с двумя импульсами через 10 пикосекунд после окончания энерговыделения от второго импульса. Задержка между импульсами 250 пикосекунд

Процесс поглощения ЛИ веществом, представленный в виде зависимостей температуры от времени для поверхностей различных плотностей, представлен на рис. 7. В одноимпульсном режиме, верхняя строка, реализуется прогрев скин-слоя, затем остывание и разлет. В двухимпульсном режиме, средняя и нижняя строки, виден прогрев скин-слоя, остывание и разлет в течение 50 и 250 пикосекунд соответственно, прогрев вторым импульсом до больших температур, а затем повторное остывание и разлет.

Проследить процесс разновременности прогрева, видимый на графиках скоростей, для расчета с задержкой 50 пикосекунд сложно из-за малого пространственного масштаба области прогрева, именно поэтому и был сделан расчет с задержкой между импульсами 250 пикосекунд. На рис. 8 представлены пространственные распределения температуры электронов (слева) и ионов (справа) через 10 пикосекунд после окончания действия второго импульса.

Основной прогрев электронов произошел в низкоплотной области в диапазоне между $0,01 n_c$ и $0,1 n_c$. Сформировалась тепловая волна, которая распространяется в обе стороны, прогревая и низкоплотные (рис. 7 снизу), и высокоплотные области. Эти особенности необходимо учитывать для последующих электродинамических расчетов. Кроме плотности важно знать число свободных электронов (или среднюю степень ионизации вещества), особенно в областях с плотностью ниже критической, поскольку там происходит ускорение заряженных частиц во время взаимодействия основного ЛИ с веществом.

Получены пространственно-временные параметры преплазмы при различных значениях контраста для случая с одиночным 1 пикосекундным импульсом. Сделана оценка влияния многоимпульсовости.

Получено, что в 2-х импульсовой конфигурации повышается прогрев низкоплотной области мишени, за которыми следуют увеличение области разлета низкоплотной области и сжатие высокоплотной. Наличие низкоплотной плазмы на фронтальной поверхности твердотельной мишени ведет к увеличению области взаимодействия ЛИ с веществом. Это приведет к увеличению максимальной энергии электронов с одновременным снижением градиента ускоряющего поля и, как следствие, уменьшение энергии ионов.

Список литературы

1. Safronov K. V. et al. Experimental characterization of charged particle beams accelerated by irradiating thin target of different materials with ultra-short laser pulses // *Quantum Electronics*, 2011. Vol. 41(4) P. 373–376.
2. Glazyrin I. V., Karpeev A. V., Bychenkov V. Yu., McGuffey C., Thomas A.G.R., Schumaker W., Matsuoka T., Chvykov V., Dollar F.J., Kalintchenko G., Yanovsky V., Maksimchuk A., Krushelnick K. Ionization induced trapping in a laser wakefield accelerator. // *Physical Review Letters*, 2010. Vol. 104. P. 025004.
3. Gavrillov D. S., Kakshin A. G., Loboda E. A. // in Proc. of 11th ZST-conference, 2012. – Snezhinsk.
4. Baksht R. B., Oreshkin V. I., Glazyrin I. V. et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1998. Vol. 26(4). P. 1259–1266.
5. Kaiser T. B. Laser ray tracing and power deposition on an unstructured three-dimensional grid. // *Physical Review E*, 2000. – Vol. 61(1) – P. 895-905.
6. MacFarlane J. J. // *Comp. Phys. Commun.*, 1989. - Vol. 56. P. 259.