

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ РАЗНОПЛОТНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ УСКОРЕНИИ ПЛОСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ МИШЕНЕЙ НА УСТАНОВКЕ «ИСКРА-4»

**В. А. Андронов**, С. А. Бельков, А. В. Бессараб, И. Н. Воронич, С. Г. Гаранин,  
А. А. Горбунов, В. Н. Деркач, Г. В. Долголева, А. И. Зарецкий, В. М. Изгородин,  
Б. Н. Илюшечкин, Г. А. Кириллов, Г. Г. Кочемасов, Ю. В. Куратов, В. И. Лазарчук,  
В. А. Лебедев, В. М. Муругов, Л. С. Мхитарьян, А. В. Окутин, С. И. Петров,  
А. В. Пинегин, Н. Н. Рукавишников, А. Н. Разин, А. В. Рядов, А. В. Сенюк,  
Н. А. Суслов, С. А. Сухарев, В. А. Токарев

Поступила в редакцию 19 апреля 1996 г.

Приведены результаты первых экспериментов по исследованию перемешивания тонких слоев Al и Au при лазерном ускорении плоских трехслойных мишеней из Si (5 мкм), Al (2 мкм) и Au (0.05–0.26 мкм) преобразованным во вторую гармонику излучением йодного лазера «Искра-4» с интенсивностью  $4\text{--}7 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> ( $\tau_{0.5} \sim 1$  нс), действующим на мишень со стороны Si. Отработана методика регистрации факта перемешивания. Установлено, что в условиях экспериментов толщина области перемешивания составляла, по меньшей мере,  $\sim 0.15$  мкм. Представлены результаты расчетного анализа процесса развития возмущений, приводящего к перемешиванию.

Турбулентное перемешивание термоядерного топлива с веществом сжимающей его оболочки мишени является серьезной проблемой в программе лазерного термоядерного синтеза. Этот процесс приводит к существенному росту энергии лазерного излучения, требуемой для осуществления зажигания лазерных мишеней [1, 2].

К настоящему времени известны [3] физико-математические модели процесса перемешивания, которые прошли экспериментальную апробацию в опытах на ударных трубах [4]. Однако процесс ускорения оболочки мишени лазерным излучением имеет ряд особенностей, что не позволяет без экспериментальной проверки перенести существующие модели на случай мишеней для лазерного термоядерного синтеза. В связи с этим представляют интерес специально поставленные эксперименты с лазерным ускорением оболочек либо их плоских аналогов.

В настоящей статье приведены результаты первых экспериментов по исследованию перемешивания тонких слоев Al и Au при ускорении трехслойных плоских мишеней Si-Al-Au на установке «Искра-4» [5]. Методический подход к проведению рассматриваемых экспериментов, который в основных чертах был предложен в работах [6, 7], реализован нами следующим образом (см. схему на рис. 1). Мишень Si-Al-Au облучается со стороны Si лазерным импульсом с длиной волны  $\lambda = 0.66$  мкм, длительностью  $\tau_p \approx (0.8\text{--}1.2)$  нс и интенсивностью  $I_p \approx (0.5\text{--}1) \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, который в дальнейшем будем называть силовым. Толщина слоя кремния подбирается, исходя из условия, что за время действия силового лазерного излучения тепловая волна не успевает достичь слоя Al, т. е. слои алюминия и золота ускоряются в «холодном» состоянии (если не учитывать их нагрева рентгеновским излучением плазменной короны и ударной волной). На границе раздела Al-Au в силу большого различия плотностей  $\rho$  указанных веществ

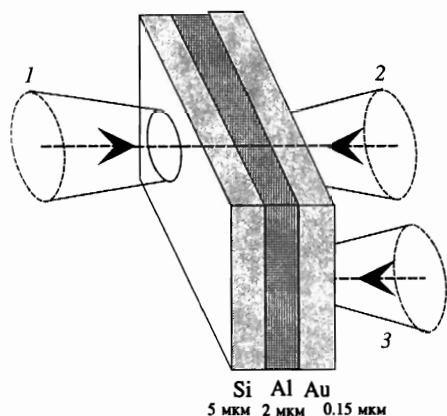


Рис. 1. Схема экспериментов по перемешиванию: силовой (1), диагностический (2) и контрольный (3) пучки

и реализующегося направления ускорения вещества ( $g\nabla\rho < 0$ ) возникают условия для развития рэлей-тейлоровской неустойчивости, следствием которой является турбулентное перемешивание.

При нагреве образовавшейся смеси этих веществ лазерным излучением подходящей интенсивности можно получить плазму из ионов Au и Al и по появлению линейчатого рентгеновского излучения последних зарегистрировать факт перемешивания. Для этого в экспериментах на тыльную сторону мишени (со стороны Au) соосно с силовым подается диагностическое излучение длительностью  $\tau_d \approx (0.3 \div 0.5)$  нс и интенсивностью  $I_d \approx < 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Время задержки диагностического пучка относительно силового выбрано таким образом, чтобы процесс перемешивания успел развиться. В рассматриваемых экспериментах эта задержка составляла  $\Delta t \sim 0.86$  нс.

При отсутствии перемешивания возможной причиной появления свечения линий Al может быть быстрое «прогорание» достаточно тонкого слоя Au из-за присутствия «горячих» пятен в распределении интенсивности по сечению диагностического пучка. Но даже и при наличии перемешивания присутствие «горячих» точек необходимо учитывать при сравнении эксперимента с расчетными оценками времени появления линейчатого рентгеновского излучения Al. Для контроля за возможностью проявления указанного эффекта на мишень со стороны золота направлялся дополнительный пучок, который в дальнейшем будем называть контрольным. Схемная задержка этого пучка относительно силового составляла  $\sim 1.6$  нс, а пятно располагалось на расстоянии 4 мм от диагностического. При этом оба пятна находились в поле зрения диагностической аппаратуры одновременно. Предполагалось, что плотности лазерных потоков и распределения интенсивности в диагностическом и контрольном пятнах будут аналогичными. Одинаковая задержка момента появления линейчатого рентгеновского излучения Al относительно начала диагностического и контрольного лазерного излучения будет свидетельствовать о прогорании слоя Au в «горячих» точках соответствующих пятен. В случае опережения импульсом рентгеновского излучения Al из диагностического пятна соответствующего рентгеновского импульса из контрольного пятна (или отсутствия последнего импульса) можно говорить о наличии перемешивания.

Технология изготовления мишени обеспечивала зеркальную поверхность слоев Al и Au с шероховатостью не более 0.05 мкм [8]. Шероховатость поверхности Si составляла 0.1–0.3 мкм. В описываемых экспериментах толщина слоя Si составляла 4.3–5 мкм, Al —

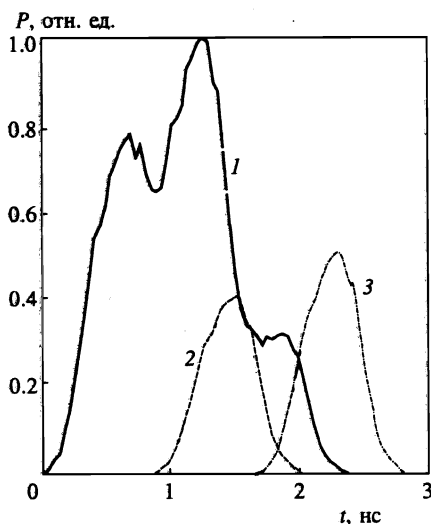


Рис. 2. Временная диаграмма облучения мишени в одном из опытов: силовой (1), диагностический (2) и контрольный (3) импульсы

1.7–2.0 мкм, Au менялась в диапазоне 0.05–0.3 мкм.

Временные параметры лазерного излучения (форма и длительность импульсов) определялись с помощью электронно-оптического прибора типа СЭР [9] с временным разрешением  $\sim 40$  пс. Значения энергии в силовом, диагностическом и контрольном пучках измерялись с помощью калориметров типа ТПИ-2А. Погрешность измерения составляла  $\pm 15\%$ . В экспериментах измерялась также энергия лазерного излучения, поглощенная мишенью. Для этого использовались плазменные и световые калориметры [10], размещенные внутри вакуумной камеры взаимодействия.

Размеры пятен облучения силового, диагностического и контрольного пучков и характер распределения интенсивности лазерного излучения в них (наличие «горячих» точек) оценивались с помощью рентгеновских камер-обскур.

Рентгеновский диагностический комплекс обеспечивал регистрацию:

интегрального по времени спектра линейчатого рентгеновского излучения плазмы в диапазонах 0.04–0.25 кэВ и 1.4–2.5 кэВ с помощью спектрографов на дифракционной решетке и кристалле КАР;

линейчатого рентгеновского излучения вблизи линии  $\text{He}_{\alpha}\text{Al}$  ( $h\nu \approx 1.6$  кэВ) на фоне рентгеновского излучения  $M$ -полосы Au с временным разрешением  $\sim 150$  пс;

сплошного спектра рентгеновского излучения плазмы в диапазоне 1–5 кэВ с временным разрешением  $\sim 50$  пс.

Форма и временная последовательность силового, диагностического и контрольного лазерных импульсов приведены на рис. 2.

Распределение интенсивности в силовом пучке было достаточно гладким. В то же время на обскуротрамах диагностического и особенно контрольного пятен облучения наблюдались довольно многочисленные «горячие» микрообласти. Поперечные размеры контрольного пятна оказались в 1.5–2 раза больше размеров диагностического пучка на мишени. Это привело к тому, что соответствующие средние интенсивности в пучках отличались в 2–3 раза. Поперечные размеры силового и диагностического пучков на мишени были близки.

Плотность потока лазерного излучения в силовом пучке менялась в диапазоне  $I_p \sim 5 \cdot 10^{13} - 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность — в пределах 0.83–1.1 нс, размер пятна — (320–520) мкм. Интенсивность диагностического пучка находилась в пределах  $(2-4) \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, а контрольного —  $(0.7 \div 2) \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> при длительности импульсов 0.3–0.5 нс. Соответствующие размеры пятен составляли  $390 \div 530$  мкм и 500–800 мкм. Коэффициент поглощения энергии силового пучка в мишени составил в экспериментах  $K_a \approx 0.9$ .

Обратимся к результатам регистрации спектра рентгеновского излучения плазмы, образующейся с тыльной стороны мишени. Прежде всего заметим, что на интегральных по времени спектрограммах линейчатое излучение Al в диапазоне 0.04–0.25 кэВ регистрировалось на фоне рентгеновского излучения золота при толщине последнего до 0.15 мкм как из диагностического, так и из контрольного пятен. Для последнего это свидетельствует либо о «прогорании» Au в «горячих» точках, либо о том, что еще в пределах длительности контрольного импульса слой Au толщиной 0.15 мкм успевает испариться.

Результаты временной регистрации рентгеновского излучения плазмы в области энергий квантов вблизи  $h\nu \sim 1.5$  кэВ при толщинах слоя золота на мишени 0.1 и 0.16 мкм приведены на рис. 3. На каждом рисунке слева представлены спектральные фотохронограммы, а справа — полученные в результате их обработки зависимости от времени интенсивности рентгеновского излучения континуума Au и линии  $He_{\alpha}Al$  ( $\lambda = 0.776$  нм). Длительность свечения континуумов Au по полувысоте примерно отвечает длительности диагностического и контрольного лазерного излучения ( $\sim 0.5$  нс), а временное расстояние между ними  $\sim 0.7$  нс, что отвечает разности времен прихода диагностического и контрольного пучков на тыльную сторону мишени. При этом временная форма свечения Al примерно повторяет форму импульса непрерывного рентгеновского спектра Au.

При толщине слоя золота 0.1 мкм линейчатое излучение Al наблюдается и для диагностического и для контрольного пучков, причем одновременно со свечением Au. Но для контрольного пучка это обстоятельство скорее всего связано с быстрым прогоранием Au в «горячих» точках, о наличии которых свидетельствовала обскурограмма опыта. В то же время достаточно хорошую синхронность импульсов рентгеновского излучения Al и Au для диагностического пучка можно объяснить наличием полного их перемешивания в результате ускорения мишени силовым лазерным излучением уже к моменту прихода диагностического импульса.

При толщине слоя золота 0.15–0.16 мкм также наблюдается достаточная синхронность импульсов свечения Au и Al в диагностическом пятне. В то же время свечение Al из контрольного пятна отсутствует. Такая картина определенно свидетельствует о наличии к приходу диагностического импульса области перемешивания Al и Au шириной 0.15–0.16 мкм.

По программе СНДП [11] с использованием физических моделей [3] проведены предварительные расчеты развития турбулентного перемешивания при ускорении трехслойной мишени. В расчетах форма силового лазерного импульса аппроксимировалась равнобедренной трапецией с длительностью по основанию  $\tau_b = 2$  нс, длительностью фронтов  $\tau_f = 0.6$  нс. Интенсивность в максимуме была равна  $I_p = 7.5 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Диагностический импульс падал на тыльную (золотую) сторону трехслойной мишени с задержкой максимума импульса относительно начала силового импульса  $\Delta t = 1.46$  нс. Форма диагностического импульса задавалась гауссовой с длительностью на полувы-

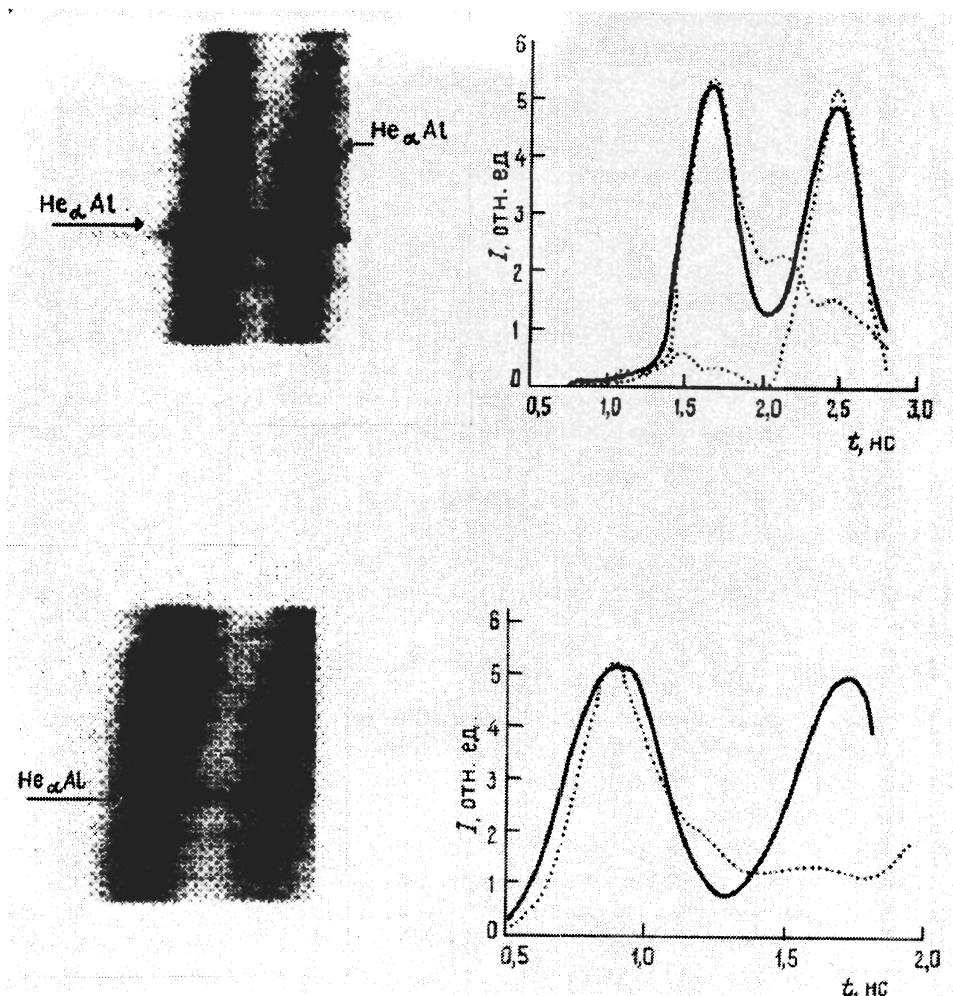


Рис. 3. Спектральные фотохронограммы и зависимости от времени интенсивности рентгеновского излучения золота (сплошная) и алюминия (пунктир). Цифрами 1 и 2 помечены спектральные полосы, отвечающие непрерывному рентгеновскому излучению из диагностического и контрольного пятен; верхняя часть рисунка соответствует  $\delta_{Au} = 0.1$  мкм, нижняя —  $\delta_{Au} = 0.16$  мкм

соте  $\tau_{0.5} = 0.45$  нс и интенсивностью в максимуме  $I_d = 3 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Толщины слоев Si (5 мкм) и Al (2 мкм) соответствовали экспериментальным. Толщина слоя Au изменялась от 0.15 до 0.3 мкм.

В расчетах учитывались следующие физические процессы: газодинамика, электронная и ионная теплопроводности, неравновесная спектральная диффузия рентгеновского излучения, релаксация электронной и ионной температур, кинетика ионизации многозарядной, многокомпонентной плазмы. Электронная теплопроводность рассчитывалась с учетом ограничения теплового потока. Коэффициент ограничения задавал-

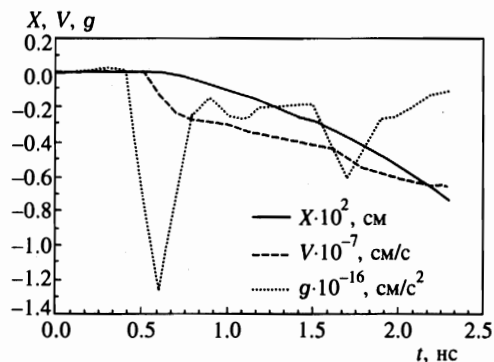


Рис. 4.  $X$ - $t$ -диаграмма движения границы раздела между слоями золота и алюминия, скорость  $V$  и ускорение границы  $g$  в расчете без перемешивания

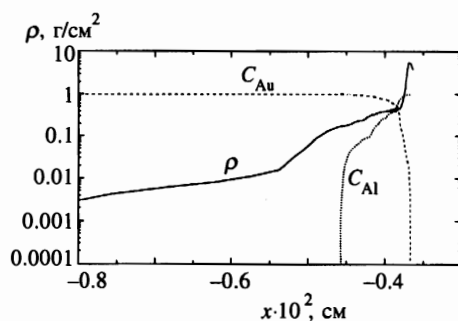


Рис. 5. Распределение плотности и массовых концентраций  $C_{Au,Al}$  золота и алюминия в расчете с перемешиванием при толщине слоя золота 0.15 мкм на момент времени  $t = 1.4$  нс

ся равным  $f = 0.1$ . Поглощение лазерного излучения рассчитывалось с учетом только тормозного механизма.

На рис. 4 показано движение границы раздела между слоями Au и Al в расчете без учета перемешивания. Примерно до момента времени  $t = 0.5$  нс движение границы обусловлено разгрузкой тонкого слоя золота под действием жесткого рентгеновского излучения лазерной короны кремния (в основном это линейчатое излучение в области  $K_{\alpha}$  кремния). Плотности Au и Al практически выравниваются, и никакого перемешивания не возникает. Затем, в момент выхода ударной волны, происходит резкое ускорение границы раздела и формируется скачок плотности. С этого момента должна развиваться рэлей-тейлоровская неустойчивость, приводящая к перемешиванию слоев.

На рис. 5 приведены профиль плотности и распределение массовых концентраций золота и алюминия в расчете с учетом перемешивания на момент времени  $t = 1.4$  нс, соответствующий приблизительно максимуму интенсивности диагностического импульса, для толщины золота 0.15 мкм. Из расчета видно, что из-за быстрой разгрузки золотого слоя под действием его прогрева жестким рентгеном лазерной короны Si зона перемешивания для реализуемых в эксперименте значений ускорения не успевает захватить весь слой. К представленному на рис. 5 моменту времени масса перемешанного слоя золота соответствует примерно половине его начальной массы. Аналогичное поведение зоны перемешивания наблюдается и в расчете с толщиной золотого слоя равной 0.3 мкм. Более существенным является сопоставление расчетных импульсов свечения линий  $He_{\alpha}Al$  в расчетах с различной толщиной золотого слоя и фонового свечения золотой плазмы.

На рис. 6 представлены расчетные зависимости интенсивности свечения линий Al от времени, полученные в расчетах с толщиной золотого слоя равной 0.15 и 0.3 мкм (соответственно кривые 1 и 2). Здесь же приведены интенсивность свечения плазмы золота (кривая 4) в спектральном диапазоне близком к энергии квантов линий гелиоподобного алюминия, а также диагностический лазерный импульс (кривая 3). Хорошо видна задержка свечения золотой плазмы относительно диагностического импульса (примерно 100 пс). Для тонкого слоя золота его свечение в непрерывном спектре и свечение линий

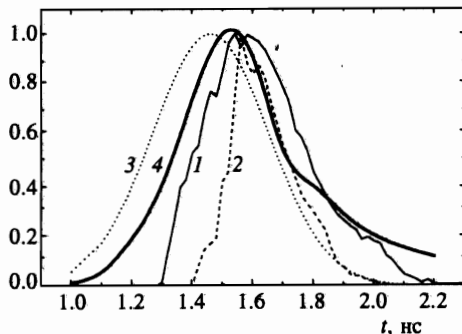


Рис. 6. Расчетные временные зависимости: свечения линий  $\text{He}_\alpha, \text{Al}$  с тыльной стороны мишени при различной толщине слоя золота (1 —  $\delta_{\text{Au}} = 0.15$  мкм, 2 —  $\delta_{\text{Au}} = 0.3$  мкм), диагностического лазерного импульса — 3 и рентгеновского излучения непрерывного спектра плазмы золота — 4

алюминия практически совпадают по времени (задержка  $\sim 50$  пс, что заметно меньше временного разрешения РЭОПа). Для толстого слоя золота наблюдается значительная задержка (около 0.2 нс) начала свечения линий алюминия относительно свечения Au в непрерывном спектре.

Из сравнения свечения Au и линий алюминия в экспериментах с различной толщиной золотого слоя можно предположить возникновение такой задержки ( $\sim 50$  пс) при толщине слоя  $\delta_{\text{Au}} \approx 0.15$  мкм, однако недостаточно высокое временное разрешение регистратора не позволяет сделать однозначный вывод о ее наличии и величине. При увеличении толщины золотого слоя можно надеяться, как показывают расчеты, на надежную регистрацию этой задержки.

## Литература

1. G. G. Kochemasov, Proceedings of the 23<sup>rd</sup> European Conference Laser Interaction with Matter. Oxford, 19–23 September 1994, Institute of Physics Conference Series Number 140, 17 (1995).
2. M. D. Cable, S. P. Hatchett, J. A. Caird et al., Phys. Rev. Lett. 73, 2316 (1994).
3. В. А. Андронов, В. И. Козлов, В. В. Никифоров, А. Н. Разин, Ю. А. Юдин, ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, вып. 2, 59 (1994).
4. В. А. Андронов, Е. Е. Мешков, В. В. Никифоров и др., ДАН СССР 264, 76 (1982).
5. И. Н. Воронич, В. А. Ерошенко, А. И. Зарецкий и др., Изв. АН СССР, сер. физ. 54, 2016 (1990).
6. A. Raven, H. Azechi, T. Yamanaka, and C. Yamanaka, Phys. Rev. Lett. 47, 1049 (1981).
7. P. A. Holstein, V. Meyer, M. Rostaing et al., Cr. Acad. Sci. Paris 307, 211 (1988).
8. Н. В. Плешивцев, Катодное распыление, Атомиздат, Москва (1968).
9. В. П. Лазарчук, В. М. Муругов, С. И. Петров, А. В. Сеник, Физика плазмы 20, 101 (1994).
10. S. R. Gann, V. C. Rupert, in Laser Program Annual Report-1975, LLNL, UCRL-50021-75, 404 (1975).
11. С. А. Бельков, Г. В. Долголева, ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, вып. 1, 59 (1992).