

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО. ЛАЗЕРНАЯ ПЛАЗМА

PACS 42.60.By; 52.57.-z; 52.38.Ph

Численное исследование динамики полей излучения в составном боксе-конвертере для условий экспериментов по измерению длин пробегов излучения на установке «Искра-5»**С.В.Бондаренко, Г.В.Долголева, Е.А.Новикова**

Представлены результаты численного анализа по программе СНД-ЛИРА динамики полей излучения (лазерного и рентгеновского) в составном рентгеновском боксе для условий экспериментов по измерению длин пробегов рентгеновского излучения на лазерной установке «Искра-5» (длина волны лазерного излучения $\lambda = 0.66$ мкм, длительность лазерного импульса $\tau_{0.5} \approx 0.6$ нс, его энергия 900 Дж). В этих экспериментах боксы-конвертеры состояли из трех секций: двух боковых отсеков (иллюминаторов) для ввода лазерного излучения и центрального отсека, в котором располагался образец из исследуемого материала. Предложена схема поэтапных вычислений динамики нагрева исследуемого образца в трехсекционном боксе-конвертере. Рассмотрены две конструкции составного бокса, различающиеся способами ввода лазерного излучения. Показано, что при торцевом вводе лазерных пучков на поверхности межсекционной перегородки формируются пятна интенсивной вторичной лазерной засветки, что ведет к разрушению пленочной перегородки и проникновению лазерного излучения в центральный (диагностический) отсек бокса. В этом случае исследуемый образец подвергается дополнительному неконтролируемому воздействию рассеянного лазерного излучения. Такой опасности удастся избежать при использовании альтернативного способа ввода лазерных пучков через четыре отверстия на боковой поверхности иллюминаторов. Для последнего случая рассчитана динамика нагрева образца и определен оптимальный момент его рентгеновского зондирования.

Ключевые слова: длины пробегов излучения, составной рентгеновский бокс-конвертер, численный анализ по программе СНД-ЛИРА.

1. Введение

Использование мощных лазерных импульсных установок представляет уникальные возможности для достижения высокой концентрации энергии в малых объемах вещества. Одним из актуальных направлений исследований является здесь измерение пробегов рентгеновского излучения в веществе, нагретом до высоких температур (от 50 до 100 эВ и выше). В таких экспериментах для нагрева вещества исследуемого образца применяется рентгеновское излучение, генерируемое во внутреннем объеме боксов. В экспериментах на установке «Искра-5» использовались составные трехсекционные боксы, состоящие из центральной части (диагностический отсек), где располагался исследуемый образец, и двух боковых отсеков (иллюминаторов), в которых происходило поглощение вводимого в бокс лазерного излучения. Для защиты образца от нежелательного воздействия лазерного излучения диагностический отсек отделялся от боковых отсеков пленкой, на поверхность которой был нанесен слой вещества с высоким атомным номером. Толщины пленки и покрытия подбирались такими, чтобы обеспечить эффективное

пропускание рентгеновского излучения в диагностический отсек.

На установке «Искра-5» были выполнены эксперименты по исследованию пробегов рентгеновского излучения в нагретых образцах из алюминия и германия толщиной ~ 0.1 мкм, заключенных между двумя слоями пластика толщиной ~ 1 мкм. Постановка экспериментов описана в [1]. Там же подробно обсуждается методика измерений и полученные результаты. В [2] приведены результаты расчетно-теоретического описания тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения алюминия и германия на основе усовершенствованной слетеровской модели среднего иона. Целью же настоящей работы являлось исключительно численное моделирование динамики полей излучения в боксе-конвертере сложной геометрии и в конечном итоге определение режима нагрева и газодинамического разлета исследуемого образца.

Для анализа результатов измерений спектральных пробегов необходимо знать состояние образца (распределение плотности и температуры в его объеме) во время действия зондирующего (просвечивающего) импульса жесткого рентгеновского излучения. Динамика поля рентгеновского излучения и его спектральные характеристики определяются поглощением лазерного излучения на внутренних поверхностях боковых отсеков (иллюминаторов) составного рентгеновского бокса. Здесь важно знать положение и размер пятен лазерной засветки, интенсивность светового поля и долю поглощенной лазерной энергии. Рентгеновское излучение, прошедшее через вещество пленки-конвертера, с одной стороны, непосредственно воздействует на образец из исследуемого материала, а с другой стороны, нагревает вещество стенок диагностического бокса. Таким образом, образец под-

С.В.Бондаренко, Е.А.Новикова. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37;

e-mail: sergvicbond@inbox.ru, novikova@md08.vniief.ru

Г.В.Долголева. Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Россия, 125047 Москва, Миусская пл., 4; e-mail: dolgg@list.ru

Поступила в редакцию 19 сентября 2013 г., после доработки – 17 декабря 2013 г.

вергается воздействию как линейчатого рентгеновского излучения из областей первичных и вторичных лазерных пятен, частично ослабленного при прохождении через объем вещества пленочного конвертера, так и квазиравновесного рентгеновского излучения стенок составного бокса.

Анализ динамики полей излучения в составном рентгеновском боксе проводился с помощью численной методики СНД-ЛИРА [3, 4]. Расчеты выполнялись в два этапа. На первом этапе моделировались условия поглощения лазерного излучения в боковых отсеках (иллюминаторах) и определялись параметры рентгеновского излучения из областей первичных и вторичных лазерных пятен, а также из областей, находящихся вне зон с высокой лазерной освещенностью. Рассчитывались потоки лазерного и рентгеновского излучений, падающие на различные участки межсекционной перегородки – пленочного конвертера. Эти потоки затем использовались как граничные условия при расчете собственной светимости вещества пленочного конвертера и характеристик прошедшего через него рентгеновского излучения. На втором этапе рассчитывались характеристики рентгеновского излучения в диагностическом отсеке и определялся режим нагрева исследуемого образца. При этом обратным влиянием квазитеплового излучения из центрального отсека составного бокса на состояние вещества и характеристики излучения из его боковых секций пренебрегалось, во-первых, из-за меньшей плотности энергии излучения в диагностическом отсеке и, во-вторых, из-за задержки по времени генерации рентгеновского излучения в центральном отсеке.

Были рассмотрены два варианта конструкции составного бокса, различающиеся расположением отверстий для ввода лазерного излучения. В первом варианте по два лазерных пучка вводились в два торцевых отверстия иллюминаторов. Во втором варианте лазерные пучки вводились через четыре отверстия, расположенные на боковой поверхности иллюминаторов.

2. Торцевой ввод лазерной энергии

На рис.1 показана схема экспериментов по измерению пробегов излучения на лазерной установке «Искра-5» [1].

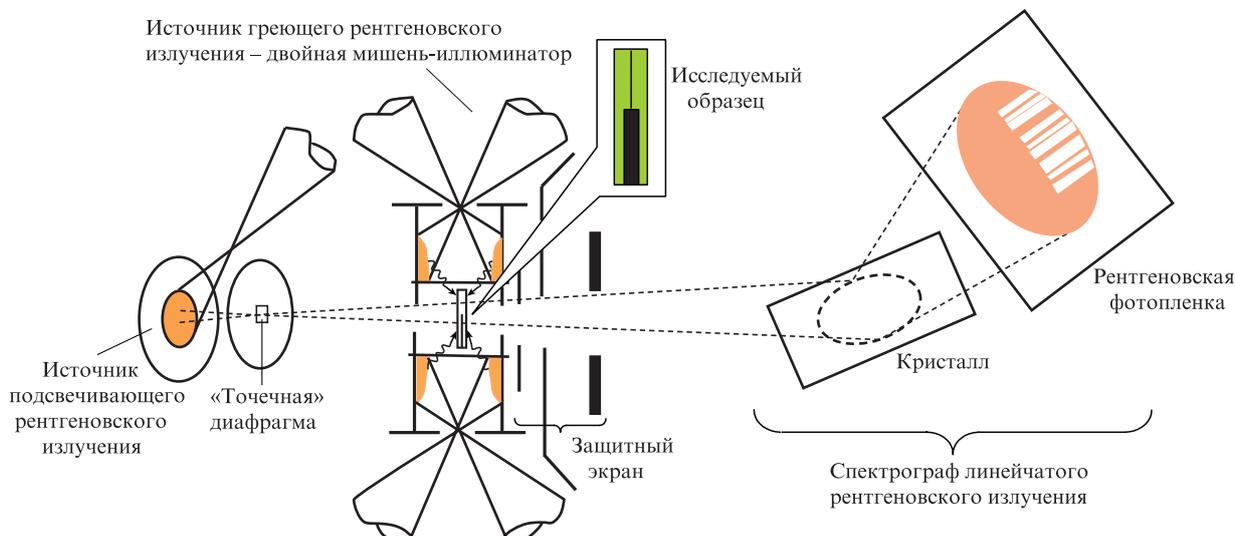


Рис.1. Схема экспериментов по исследованию пробегов рентгеновского излучения на лазерной установке «Искра-5» с торцевым вводом пучков.

В этих экспериментах исследуемый образец помещался в центральном отсеке трехсекционного бокса-конвертера. Вторая гармоника излучения неодимового лазера ($\lambda = 0.53$ мкм) вводилась через торцевые отверстия во внутренний объем двух боковых отсеков-иллюминаторов (по два пучка в каждый отсек), отделенных от центрального отсека пластиковой пленкой с нанесенным на нее слоем золота толщиной 0.1 мкм. Для более эффективной конверсии энергии лазерного драйвера в рентгеновское излучение внутренняя поверхность составного бокса была покрыта слоем золота толщиной ~ 1 мкм. Нагретый образец просвечивался жестким рентгеновским излучением. Сравнение спектра рентгеновского излучения, прошедшего через образец с исследуемым веществом, со спектром излучения источника позволяет определить спектральные характеристики поглощения рентгеновского излучения в этом веществе.

В расчетах по программе СНД-ЛИРА исследовался процесс нагрева составного бокса диаметром 1.0 мм четырьмя лазерными пучками с суммарной энергией $E_L \approx 900$ Дж и длительностью импульса $\tau_{0.5} = 0.675$ нс, вводимыми во внутренний объем боковых отсеков-иллюминаторов через торцевые отверстия диаметром 600 мкм. Длина каждого отсека составляла 1.2 мм.

Лазерные пучки, вводимые через боковые отверстия, падают на цилиндрическую поверхность иллюминатора под значительными углами ($\sim 60^\circ$ к нормали). В таких условиях в пятнах первичной засветки происходит лишь частичное поглощение лазерного излучения. Отражаясь от цилиндрической поверхности иллюминатора, лазерные пучки фокусируются в направлении, перпендикулярном его оси, что приводит к формированию зон интенсивной вторичной засветки. Поперечный размер пучков составлял 30×30 см, фокусировка осуществлялась линзовым объективом с фокусным расстоянием $F = 1600$ мм.

Для прояснения характера перераспределения энергии отраженного лазерного излучения на внутренних поверхностях иллюминаторов были проведены расчеты с модельным коэффициентом поглощения

$$k = k_0 \cos^3 \theta, \quad (1)$$

где $k_0 = 0.5$; θ – угол падения излучения на поверхность.

Уточним применимость формулы (1). Для рассматриваемых условий поглощение лазерного излучения происходит преимущественно по обратнотормозному механизму. Вопросы распространения и поглощения оптического излучения в плазме подробно обсуждались в монографии [5]. Как известно, поперечные электромагнитные волны не могут распространяться в плазме с плотностью ρ , превышающей критическую плотность

$$\rho_c = 1.87 \times 10^{-3} \frac{A}{Z\lambda^2}, \quad (2)$$

где A и Z – атомный вес и кратность ионизации вещества плазмы соответственно; плотность взята в г/см^3 , а длина волны – в микрометрах. Вблизи критической поверхности, на которой для данной длины волны света действительная часть диэлектрической проницаемости плазмы

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\rho}{\rho_c}$$

обращается в нуль, происходит отражение лазерного излучения. Здесь

$$\omega_p = \left(\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e} \right)^{1/2}$$

– ленгмюровская частота; e и m_e – заряд и масса электрона; n_e – концентрация электронного газа. На рис.2 показана характерная траектория луча света. При падении под углом θ из вакуума с показателем преломления $n = 1$ луч света достигает слоя плазмы с $n = \sin\theta$ ($\rho = \rho_c \cos^2\theta$). Вследствие изменения показателя преломления среды в этом слое происходит поворот его траектории (рефракция света).

Мнимая часть диэлектрической проницаемости плазмы, описывающая поглощение электромагнитных волн в ней, обусловлена столкновениями заряженных частиц. Будем считать нагреваемую лазерным излучением плазму изотермической и однородной по зарядовому составу. В этом случае поглощение лазерной энергии на единице длины пропорционально квадрату плотности плазмы:

$$k_{st} = a\rho^2\lambda^2 \ln A_{ei} \propto \rho^2 \quad (3)$$

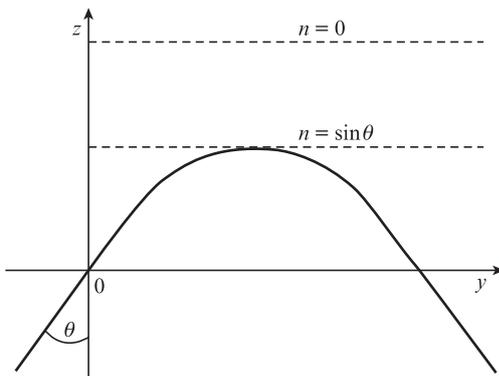


Рис.2. Характерная траектория луча света в плазме.

(кулоновский логарифм $\ln A_{ei}$ слабо зависит от параметров плазмы, поэтому будем считать его константой). Коэффициент поглощения

$$k = 1 - e^{-\tau} \quad (4)$$

определяется суммарной оптической толщиной $\tau = \int k_{st}(s)ds$ вдоль траектории распространения светового луча, по которой отсчитывается координата s . Нас интересует, прежде всего, ситуация, когда при больших углах падения θ происходит существенное уменьшение поглощения лазерного излучения в пристеночной плазме. Поскольку при этом отражается значительная часть лазерной энергии, оптическая толщина τ невелика и в (4) можно ограничиться первым членом разложения в ряд $k \approx \tau$. Течение пристеночной плазмы можно приближенно описывать с помощью модели изотермической разгрузки, для которой характерно чрезвычайно резкое (экспоненциальное) распределение плотности. Это означает, что вся оптическая толщина τ в (4) «нарабатывается» в области максимальных по лучевой траектории плотностей, т.е. вблизи точки поворота, где $\rho \approx \rho_c \cos^2\theta$. Дистанция Δs , проходимая лучом в среде при угле падения θ , обратно пропорциональна косинусу этого угла: $\Delta s \propto 1/\cos\theta$. Поэтому $\tau \approx k_{st} \Delta s \propto \cos^3\theta$ и мы приходим к угловой зависимости (1).

На рис.3 показана схема лазерной засветки внутренней поверхности иллюминатора. Видно, что отраженное лазерное излучение формирует на поверхности пленочного экрана пятна интенсивной вторичной лазерной засветки, освещенность которых превышает интенсивность засветки первичных пятен. Это является результатом зеркального отражения лазерного пучка от внутренней поверхности цилиндрического зеркала в случае, когда ось

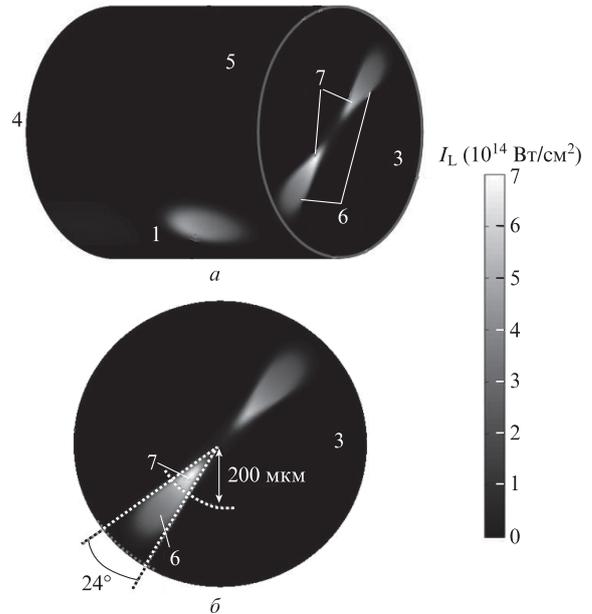


Рис.3. Схема секторного разбиения внутренней поверхности иллюминаторов – общий вид (а) и расположение секторов в области вторичных лазерных пятен на пленочном конвертере (б): 1, 2 – пятна первичной лазерной засветки; 3 – пленка-конвертер; 4 – торец иллюминатора; 5 – боковая поверхность иллюминатора вне лазерных пятен; 6, 7 – зоны вторичных лазерных пятен; сектор 2 расположен на противоположной (относительно оси симметрии) стороне цилиндрической поверхности иллюминатора.

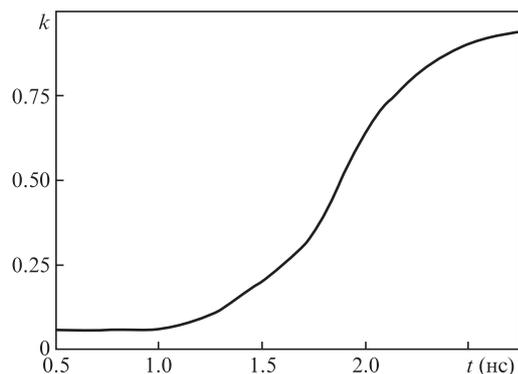


Рис.4. Временная зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения в области лазерных пятен (на поверхностях секторов 1 и 2).

пучка проходит через ось отражающей цилиндрической поверхности.

Для проведения адекватной экспериментальной ситуации численного моделирования необходимо учесть влияние зон интенсивной вторичной лазерной засветки. Схема секторного разбиения внутренней поверхности иллюминатора, использованного при расчетах по программе СНД-ЛИРА, тоже приведена на рис.3 (см. также табл.1).

На рис.4 показана временная зависимость коэффициента поглощения в первичных пятнах, полученная при расчете по программе СНД-ЛИРА (максимум интенсивности лазерного импульса приходился на момент времени $t = 1.0$ нс). Видно, что в первичных пятнах поглощается не более 10% энергии падающего лазерного излучения. Поглощение во вторичных пятнах существенно выше, т.к. для них углы падения излучения на поверхность составляют $25^\circ - 35^\circ$.

В табл.1 приведены данные по балансу лазерной энергии, полученные при расчете по программе СНД-ЛИРА, из которых следует, что внутри иллюминатора осуществляется перераспределение лазерного излучения и его концентрация в зонах интенсивной вторичной лазерной засветки на поверхности пленочного конвертера. Уже в течение первой половины лазерного импульса в этих зонах происходит прогорание пленки-конвертера (т.е. слои золота и пластика разгружаются до плотностей ниже

Табл.1. Баланс лазерной энергии в иллюминаторе при торцевом вводе лазерных пучков.

Номер сектора	Сектор	S (мм ²)	E_L (Дж)
0	Отверстия	0.283	20.7
1	Первичные лазерные пятна на цилиндрической поверхности иллюминатора	0.059	21.7
2	Пленочный конвертер вне вторичных пятен	0.059	21.6
3	Торец иллюминатора	0.503	43.4
4	Цилиндрическая поверхность иллюминатора	3.65	13.7
6	Вторичные лазерные пятна на пленочном конвертере	0.074	208.7
7	Вторичные лазерные пятна на пленочном конвертере	0.0167	144.3
	Σ	5.34	486.2

Примечания: S – площадь поверхности данного сектора; E_L – энергия поглощенного (или пропущенного пленочным конвертером в секторах 6 и 7) лазерного излучения.

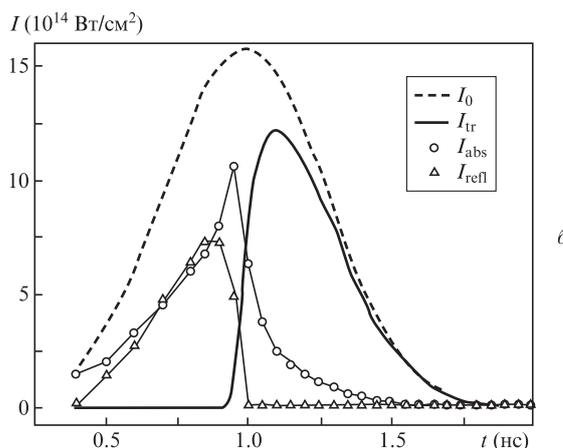
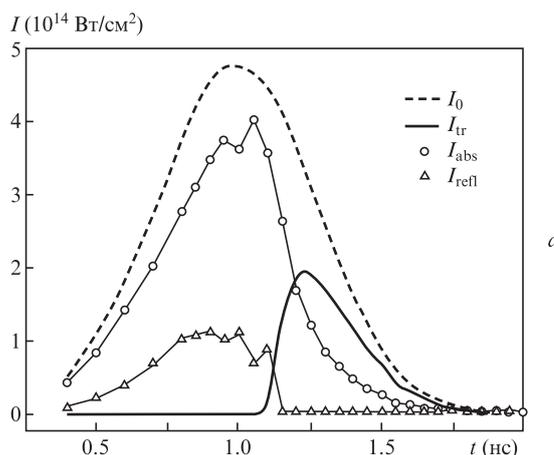


Рис.5. Интенсивности I_0 , I_{abs} , I_{tr} и I_{refl} соответственно падающего, поглощенного, прошедшего через пленочный конвертер и отраженного лазерного излучения для вторичного лазерного пятна на пленочном конвертере в секторах 6 (а) и 7 (б).

критической) и лазерное излучение частично проникает в диагностический бокс.

На рис.5 приведены потоки энергии лазерного излучения (падающего, поглощенного, отраженного и прошедшего через пленочный конвертер) в секторах пленочного экрана в различные моменты времени. Вещество пленки-конвертера в секторе 6 прогорает (т.е. пропускает лазерное излучение в центральный отсек) в момент времени $t = 1.125$ нс. Энергия излучения, проникающего через пленочный конвертер в диагностический отсек бокса, составляет $\sim 20\%$ от энергии падающего лазерного излучения. В секторе 7 (где лазерная интенсивность оказывается в три раза выше) прогорание происходит в момент времени $t \approx 0.95$ нс и пропускание составляет 44%. Таким образом, лазерное излучение с энергией ~ 200 Дж проникает во внутренний объем диагностического бокса со стороны обоих боковых отсеков.

Следует отметить, что описание взаимодействия наклонно падающего лазерного пучка (после его отражения от цилиндрического зеркала) с веществом пленочного конвертера представляет собой непростую задачу, которая может быть проанализирована в рамках используемого в расчетах секторного приближения лишь в общих чертах. Невозможно, в частности, предсказать направление распространения лазерного излучения после его прохождения через вещество пленочного конвертера. Не исключено, что при этом существенному воздействию подвергается и сам исследуемый образец.

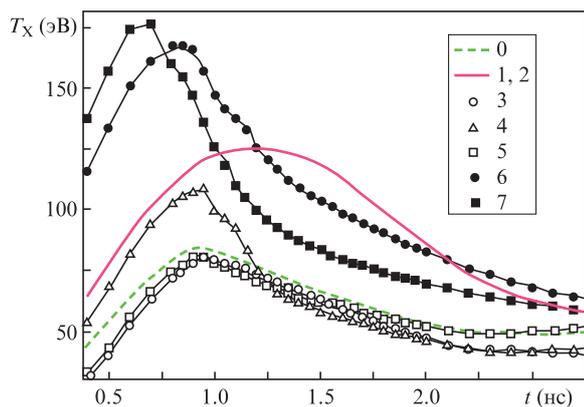


Рис.6. Временная зависимость эффективной температуры светимости T_X различных областей (секторов) внутренней поверхности иллюминатора при торцевом вводе лазерных пучков. Номера секторов соответствуют данным табл.1 и рис.3.

На рис.6 показаны временные зависимости эффективной температуры собственной светимости различных участков внутренней поверхности иллюминатора. Первый всплеск рентгеновского излучения связан с нагревом вещества пленочного конвертера в зонах вторичных лазерных пятен. В секторе 7 максимальная температура излучения $T_X = 175$ эВ достигается при $t = 0.7$ нс, а в секторе 6 максимальная температура $T_X = 167$ эВ достигается при $t = 0.85$ нс. В последующие моменты времени сильно нагретое (до температуры электронов $T_e = 4 - 5$ кэВ) вещество пленки-конвертера в этих зонах испытывает интенсивную разгрузку, вследствие чего его светимость стремительно снижается еще до достижения максимума интенсивности лазерного импульса. Рост температуры излучения заднего торца иллюминатора (сектор 4) до 108 эВ связан с нагревом его поверхности излучением, приходящим из зоны вторичных лазерных пятен. В области первичных лазерных пятен при $t = 1.0 - 1.5$ нс достигаются температуры излучения $T_X = 120 - 130$ эВ. Температура излучения боковой поверхности иллюминатора не поднимается выше 80 эВ. Это соответствует средней эффективной температуре греющего излучения, падающего на эту поверхность.

Рентгеновское излучение внутри центрального (диагностического) отсека составного бокса генерируется в результате нагрева наружной (покрытой золотом) поверхности двух пленочных конвертеров потоками падающего на них лазерного и рентгеновского излучений. Эти потоки рассчитывались на первом этапе вычислений, в ходе которого проводилось численное моделирование динамики полей излучения в боковых отсеках (иллюминаторах) составной рентгеновской мишени. При проведении расчетов предполагалось, что обратным влиянием, т.е. влиянием потоков энергии со стороны центрального отсека в боковые отсеки составного бокса, можно пренебречь.

Анализ физических условий в боковых отсеках-иллюминаторах показал, что к середине лазерного импульса нарушается целостность разделительных межсекционных перегородок, вследствие чего лазерное излучение проникает во внутренний объем диагностического бокса. Это приводит как к дополнительному нагреву стенок бокса, так и к неконтролируемому воздействию на сам исследуемый образец.

Расчет баланса энергии показывает, что без учета влияния лазерного излучения энергия рентгеновского излучения стенок центрального отсека составила всего 140 Дж.

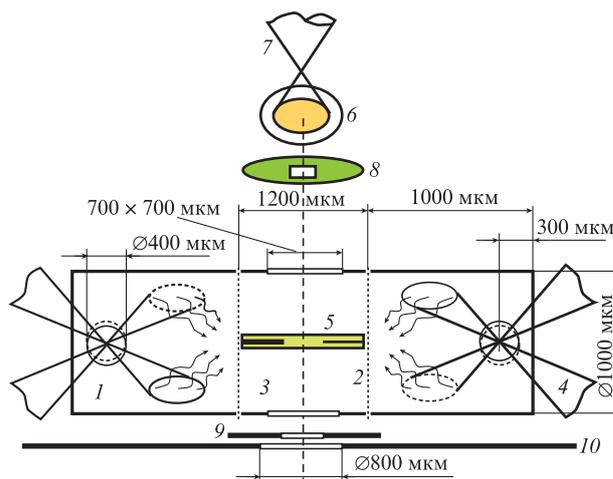


Рис.7. Схема экспериментов по исследованию пробегов рентгеновского излучения с вводом пучков через два отверстия на цилиндрической поверхности иллюминатора:

1 - мишень-иллюминатор; 2 - перегородка; 3 - диагностический отсек; 4 - пучок лазерного излучения; 5 - нагреваемое исследуемое вещество; 6 - дополнительная мишень; 7 - пучок лазерного излучения подсвечивающего рентгеновского источника; 8 - диафрагма с «точечным» отверстием; 9, 10 - защитные маски.

При этом внутрь бокса проникает лазерное излучение с энергией до 200 Дж. Закономерности распространения рассеянного лазерного излучения в центральном отсеке не могут быть установлены с приемлемой точностью в рамках используемого секторного приближения, что делает невозможным последовательный учет воздействия, вносимого лазерным излучением.

Таким образом, при торцевом вводе лазерных пучков, вследствие разрушения разделяющих отсеки бокса пленочных перегородок, оказывается невозможным численное предсказание состояния исследуемого образца. Поэтому мы здесь опускаем расчетные данные, касающиеся условий в центральном отсеке составного бокса. Можно лишь отметить, что в диагностическом отсеке бокса эффективная температура рентгеновского излучения может достигать 70–80 эВ (см. рис.6).

3. Боковой ввод лазерной энергии

На рис.7 приведена схема экспериментов при боковом вводе лазерной энергии во внутренний объем составного бокса-конвертера. Изменение способа ввода четырех лазерных пучков существенно меняет структуру распределения поглощения лазерной энергии на внутренней поверхности боковых отсеков-иллюминаторов. В этом случае поглощение лазерного излучения в первичных пятнах оказывается выше, и формирования зон интенсивной вторичной засветки на поверхности пленочных конвертеров не происходит. В результате сохраняется целостность межсекционных перегородок бокса и лазерное излучение не проникает во внутренний объем диагностического отсека.

3.1. Внешний отсек (иллюминатор)

На рис.8 показано распределение поглощения энергии лазерного излучения на внутренней поверхности бокового отсека-иллюминатора, полученное в модельном расчете с коэффициентом поглощения k (1). Видно, что

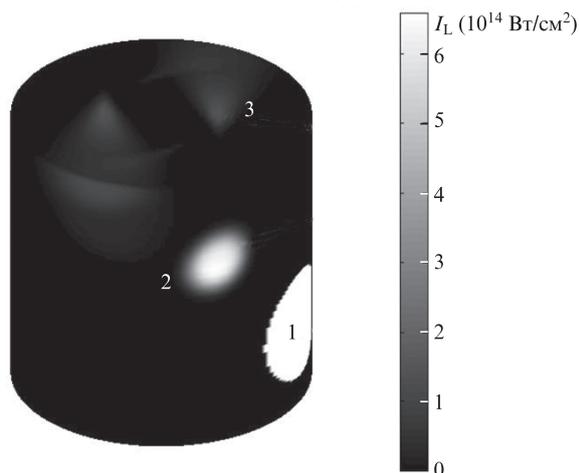


Рис.8. Распределение энергии поглощенного лазерного излучения на внутренней поверхности бокового отсека (при боковом вводе лазерных пучков), полученное в модельном расчете с коэффициентом поглощения вида (1):

1 – отверстия для ввода лазерного излучения; 2,3 – первичные и вторичные лазерные пятна соответственно.

поглощение лазерного излучения наиболее существенно в области первичных лазерных пятен. При этом в отличие от схемы торцевого ввода лазерных пучков рассеянное излучение не формирует на пленочном конвертере ярких зон вторичной лазерной засветки. (При боковом вводе лазерной энергии рассеянное излучение распространяется внутри иллюминатора по винтовым траекториям, что исключает концентрацию лазерной энергии в приосевых областях.)

Изменение способа ввода лазерных пучков привело к изменению углов падения лазерного излучения на внутреннюю поверхность иллюминатора. На рис.9 для различных областей внутренней поверхности иллюминатора представлены зависимости коэффициента поглощения k лазерного излучения от времени. Видно, что в первичных пятнах поглощается свыше 50% падающего потока лазерной энергии (ср. с рис.4), в то время как для пленочного конвертера $k \approx 0.02$. Такие различия обусловлены тем, что теперь в области первичных пятен лазерное излучение падает на поверхность под углами $25^\circ - 40^\circ$, а на поверхность пленки-конвертера – под углами $60^\circ - 70^\circ$.

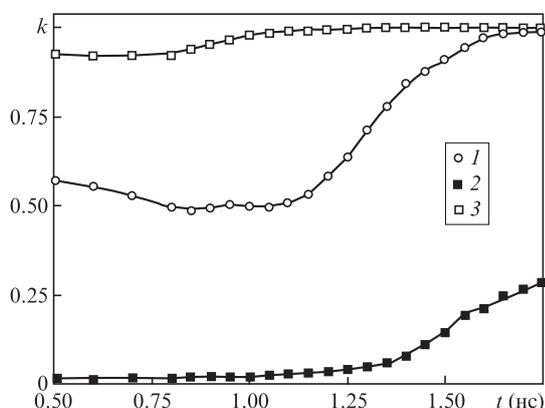


Рис.9. Временные зависимости коэффициента поглощения лазерного излучения k (при боковом вводе лазерных пучков) в первичных (1) и вторичных (2) лазерных пятнах на пленочном конвертере, а также на боковой поверхности цилиндрического иллюминатора (3).

Табл.2. Баланс лазерной энергии в иллюминаторе при боковом вводе лазерных пучков.

Номер сектора	Сектор	S (мм ²)	E_L (Дж)
0	Отверстия	0.257	0.15
1	Первичные лазерные пятна на цилиндрической поверхности иллюминатора	0.029	136
2	Пленочный конвертер	0.029	136
3	Торец иллюминатора	0.785	4.5
4	Торец иллюминатора	0.785	0.007
5	Цилиндрическая поверхность иллюминатора	2.826	201
Σ		4.712	478

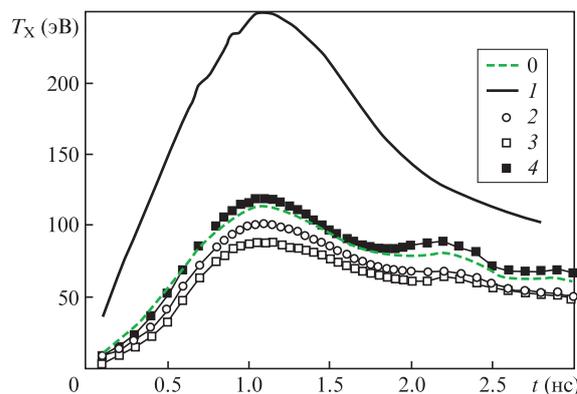


Рис.10. Временные зависимости эффективной температуры светимости T_x внутренней поверхности иллюминатора в области первичных лазерных пятен (1), на пленочном конвертере (2), на заднем торце иллюминатора (3) и на боковой поверхности иллюминатора (4). Кривая с номером 0 – температура рентгеновского излучения, выходящего через отверстия.

При секторном разбиении выделялись области первичных лазерных пятен – секторы 1 и 2, пленочный конвертер – сектор 3, торец иллюминатора – сектор 4 и цилиндрическая поверхность иллюминатора – сектор 5. В табл.2 представлен баланс поглощения лазерной энергии на внутренней поверхности иллюминатора. Видно, что существенное поглощение лазерного излучения происходит в зонах первичных лазерных пятен. Сопоставимая доля лазерной энергии поглощается на боковой (цилиндрической) поверхности иллюминатора.

На рис.10 показаны временные зависимости эффективной температуры светимости различных участков внутренней поверхности иллюминатора. В узких зонах первичных лазерных пятен, где вещество сильно нагревается интенсивным лазерным излучением, температура излучения T_x достигает ~ 250 эВ. При этом светимость данных зон существенно превышает светимость остальной части внутренней поверхности иллюминатора. На боковой поверхности температура собственной светимости составляет ~ 120 эВ, а на поверхности разделительной пленки она равна ~ 100 эВ.

На рис.11 приведены спектры рентгеновского излучения для различных участков внутренней поверхности иллюминатора. Видно, что в области первичных пятен в спектре присутствует значительная доля жесткого излучения М-полосы золота с энергией рентгеновских квантов 2.5–3 кэВ.

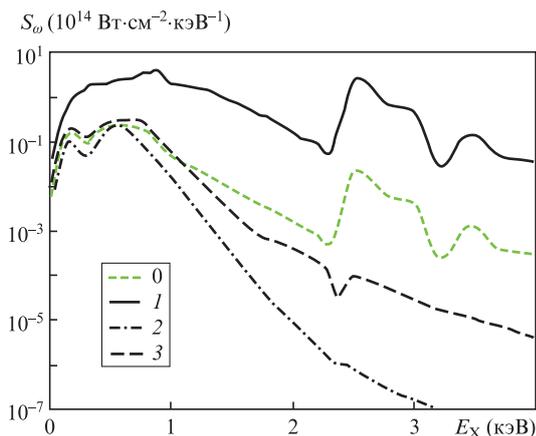


Рис.11. Спектры S_ω рентгеновского излучения стенок иллюминатора (при вводе лазерных пучков через отверстия на боковой поверхности иллюминатора) в момент их максимальной светимости ($t = 1.15$ нс) для области первичных лазерных пятен (1), пленочного конвертера (2) и на боковой поверхности иллюминатора (3). Кривая с номером 0 – спектр излучения, выходящего через отверстия.

3.2. Центральный бокс

С использованием вычисленных на первом этапе расчета спектральных потоков рентгеновского излучения, падающих на внешнюю границу пленки-конвертера, на втором этапе по программе СНД-ЛИРА рассчитывались условия в центральном отсеке составного бокса. В диагностическом отсеке секторы 1 и 2 соответствовали поверхностям пленочного конвертера, а сектор 3 соответствовал боковой поверхности. Для анализа условий на поверхности исследуемого образца выделялся дополнительный сектор 4.

На рис.12 показаны временные зависимости эффективной температуры светимости стенок диагностического отсека бокса. Излучение стенок иллюминатора проходит через вещество пленочного конвертера и нагревает боковую (цилиндрическую) поверхность центрального отсека. Температура излучения пленки-конвертера T_X достигает 90 эВ. Максимальная температура светимости боковой поверхности составляет ~ 60 эВ. В сумме эти воздействия создают поле греющего излучения на исследуемом образце с температурой, достигающей в максимуме ~ 70 эВ. На рис.13 приведены спектры излучения пленоч-

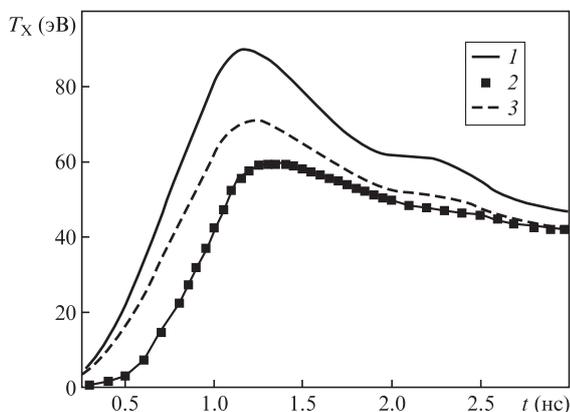


Рис.12. Временные зависимости эффективной температуры светимости пленочного конвертера (1) и боковой поверхности центрального бокса (2). Кривая 3 – температура рентгеновского излучения, падающего на исследуемый образец.

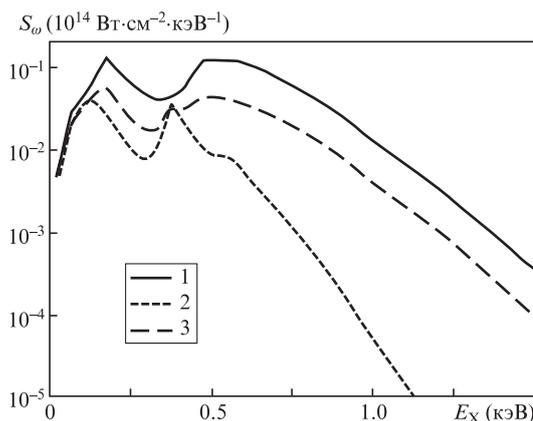


Рис.13. Спектры рентгеновского излучения пленочного конвертера (1) и боковой цилиндрической поверхности центрального бокса (2), а также излучения, падающего на исследуемый образец (3).

ного конвертера и боковой поверхности диагностического отсека в момент максимума светимости, а также спектр излучения, падающего на образец.

Рассмотрим динамику характеристик вещества исследуемого образца, состоящего из слоя алюминия толщиной 0.2 мкм в обкладках из пластика толщиной 1 мкм, под действием поля греющего излучения, генерирующегося в диагностическом отсеке бокса. Будем считать, что просвечиваемый образец расположен в центре отсека и

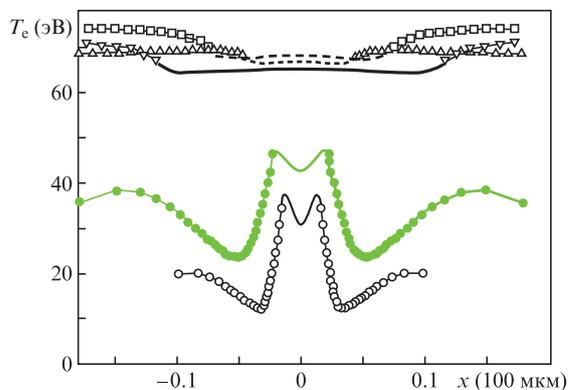
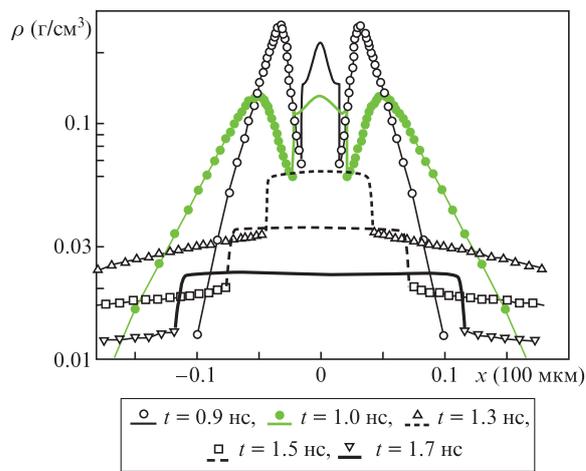


Рис.14. Состояние вещества исследуемого образца из алюминия (кривые без маркеров) и обкладок из пластика (кривые с маркерами) при двустороннем нагреве излучением в различные моменты времени: плотность образца (а) и температура электронов (б).

осуществляется режим его двустороннего нагрева квазитепловым излучением. На рис.14 показаны распределения плотности и температуры электронов в объеме исследуемого образца в различные моменты времени. Видно, что все вещество алюминиевого слоя поддерживается при одинаковых условиях (так, при $t = 1.3$ нс изменение температуры во всем объеме слоя не превышает ~ 1 эВ, а вариация плотности – 4%).

4. Заключение

Предложенная схема численных расчетов динамики полей излучения (лазерного и рентгеновского) в составных боксах-конвертерах лазерных мишеней использовалась для экспериментов по измерению спектральных длин пробегов излучения в веществе. Схема базируется на поэтапных расчетах по численной методике СНД-ЛИРА. На первом этапе рассчитываются характеристики рентгеновского излучения в боковых отсеках-иллюминаторах составного бокса, генерирующегося при поглощении лазерного излучения с высокой интенсивностью, и определяются потоки энергии лазерного и рентгеновского излучений, падающие на поверхность межсекционной перегородки – разделительной пленки-конвертера. На втором этапе с использованием найденных граничных потоков излучения рассчитываются характеристики рентгеновского излучения в центральном (диагностическом) отсеке бокса.

Показано, что при торцевом вводе четырех лазерных пучков с энергией ~ 900 Дж на поверхности пленочного конвертера формируются интенсивные пятна вторичной лазерной засветки. Это приводит к прогоранию материала пленки-конвертера и поступлению лазерного излуче-

ния с энергией ~ 200 Дж во внутренний объем диагностического отсека бокса. Вследствие этого возможно интенсивное дополнительное неконтролируемое воздействие как на стенки центрального отсека, так и на сам исследуемый образец.

Был рассмотрен также вариант бокового ввода лазерных пучков. Установлено, что в этом случае не происходит формирования сколько-нибудь интенсивных зон вторичной лазерной засветки и гарантируется локализация лазерного излучения в пределах боковых отсеков (иллюминаторов). При таком вводе пучков использование предложенной двухэтапной схемы расчетов оказывается успешным и в рамках секторного приближения удается провести сквозной расчет динамики полей излучения (лазерного и рентгеновского) в трехсекционном боксе. Показано, что при двустороннем режиме нагрева образца (расположенного в центре диагностического отсека) можно обеспечить высокую однородность распределений плотности и температуры в объеме исследуемого материала. Оптимальное время задержки зондирующего рентгеновского импульса, при котором образец является однородным по плотности и температуре, составляет 1.3–1.7 нс.

1. Бондаренко С.В., Гаранин С.Г., Жидков Н.В., Пинегин А.В., Суслов Н.А. *Квантовая электроника*, **42** (1), 51 (2012).
2. Бельков С.А., Шаров О.О. *Квантовая электроника*, **41** (10), 901 (2011).
3. Бондаренко С.В., Долголева Г.В., Новикова Е.А. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов*, вып. 3-4, 15 (2007).
4. Бондаренко С.В., Долголева Г.В., Новикова Е.А. *Квантовая электроника*, **37** (4), 372 (2007).
5. Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме* (М.: Физматгиз, 1960).