

# Малоплотный поглотитель-конвертор в лазерных термоядерных мишенях прямого облучения

С.Ю.Гуськов, Ю.А.Меркульев

*Предложен вариант термоядерной мишени для прямого облучения лазерным импульсом, обеспечивающей практически произвольную степень конверсии лазерного излучения в мягкое рентгеновское излучение. Основным элементом мишени является внешний сферический слой из малоплотного композиционного вещества с плотностью, близкой к критической плотности плазмы. Вещество слоя представляет собой пористую среду легких элементов (пористый бериллий, пористые пластики) с распределенными в ней кластерами тяжелых элементов (золото, медь). Такой слой одновременно выполняет функции поглотителя лазерного излучения и конвертора лазерного излучения в рентгеновское. Развита теория образования плазмы и генерации собственного излучения в такого рода композиционном веществе при его облучении мощным лазерным импульсом. Показано, что эффективность вклада энергии рентгеновского излучения в мишени с малоплотным поглотителем-конвертором выше, чем в мишени прямого облучения с твердотельным конвертером и мишени непрямого облучения. Обсуждаются технологические возможности создания композиционных малоплотных сред, содержащих кластеры тяжелых элементов, с параметрами, обеспечивающими эффективную работу поглотителя-конвертора в лазерных термоядерных мишенях.*

**Ключевые слова:** лазерный термоядерный синтез, взаимодействие лазерного излучения с веществом, поглотитель-конвертор.

## 1. Введение

Как известно, один из наиболее эффективных способов однородного нагрева сферической термоядерной мишени инерциального термоядерного синтеза основан на преобразовании энергии излучения драйвера (лазерных или ионных пучков) в энергию мягкого рентгеновского излучения [1]. Естественно, что с энергетической точки зрения этот способ должен обеспечивать максимальную степень конверсии энергии драйвера в энергию рентгеновского излучения и максимальную эффективность использования энергии образующегося рентгеновского излучения для сжатия и нагрева термоядерной плазмы.

Степень конверсии при воздействии лазерного импульса на плоскую твердотельную мишень зависит от интенсивности и длины волны лазерного излучения, вещества мишени и ее толщины. Наибольшая степень конверсии достигается в «толстых» мишенях, толщины которых во много раз превышают абляционную толщину, когда энергия пучка лазерного излучения преобразуется в энергию одностороннего встречного потока собственного излучения плазмы. В этом случае степень конверсии растет с уменьшением длины волны лазерного излучения. При длинах волн 0.25–1.06 мкм максимальная степень конверсии получена для лазерного излучения с интенсивностью  $10^{14}$ – $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> и составляет 60–80 % его энергии [1–3].

Особенность конверсии «тонких» мишеней, толщины которых сравнимы с абляционной толщиной, состоит в том, что при одностороннем облучении лазерным пуч-

ком может быть реализована конверсия в двухсторонние потоки рентгеновского излучения: во встречный поток, проходящий через облучаемую поверхность мишени, и в поток, проходящий через ее тыльную сторону. Однако вследствие больших потерь на гидродинамическое движение вещества полная конверсия в «тонких» мишенях оказывается в 2–3 раза меньше, чем в «толстых» [4]. При этом доля энергии проходящего рентгеновского излучения, которая, вообще говоря, для малых толщин мишени (доли микрометра для фольги из золота) может достигать 50 % всей энергии рентгеновского импульса, сильно зависит от толщины мишени.

По указанным выше причинам современная концепция рентгеновской мишени непрямого сжатия (так называемой непрямой мишени) основана на способе односторонней конверсии лазерного излучения во встречный поток рентгеновского излучения в «толстой» мишени. Мишень непрямого сжатия состоит из двух основных элементов: внешней массивной оболочки-конвертора (цилиндрической [3] или сферической [5] формы) и находящейся внутри нее сферической капсулы с термоядерным веществом. Лазерные пучки вводятся внутрь конвертора через специальные отверстия и фокусируются на его внутренней поверхности, где и происходит преобразование лазерного излучения во встречный поток рентгеновского излучения.

Обеспечивая высокую эффективность и надежность конверсии, этот способ преобразования лазерного излучения в рентгеновское имеет ряд недостатков. Они обусловлены, в основном, сложностью процедуры облучения мишени, которая позволяет минимизировать размеры конвертора только до определенного предела. Так, в мишени непрямого сжатия, рассчитанной для экспериментов на установке NIF (Ливерморская национальная лаборатория, США), отношение площадей поверхности

термоядерной капсулы и внутренней поверхности конвертора составляет  $\sim 1:20$ , вследствие чего только 20 % энергии рентгеновского излучения воздействует на термоядерную капсулу. При ожидаемой степени конверсии 60–80 % для нагрева и сжатия рабочей термоядерной мишени будет использоваться только 12–18 % лазерной энергии.

По этой причине поиск надежных и эффективных способов конверсии лазерного излучения в проходящий поток рентгеновского излучения, приемлемых для использования в термоядерной мишени с прямым облучением, представляет собой крайне важную для лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) задачу.

Одно из направлений такого поиска связано с возможностью использования малоплотного протяженного конвертора. Действительно, условиями высокой степени конверсии внутренней энергии нагретого тела в энергию теплового излучения являются, во-первых, термодинамически равновесное состояние излучения, при котором пробег квантов близок к наименьшему размеру конвертора, и, во-вторых, малая по сравнению со скоростью потери энергии на излучение скорость потери энергии на гидродинамическое движение вещества.

В работе [6] было показано, что при температуре плазмы тяжелых элементов (золото, медь и ряд других) в несколько сот электронвольт, соответствующей температуре короны лазерной термоядерной мишени, условие термодинамического равновесия излучения в плазме с размерами, близкими к размерам мишени, достигается при плотности вещества  $10^{-2} - 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>, что значительно меньше плотности указанных веществ в нормальном состоянии, но больше критической плотности плазмы, например для длины волны неодимового лазера.

В случае сплошного вещества последнее обстоятельство оставляет неопределенным способ нагрева конвертора лазерным излучением, при котором можно было бы избежать значительных потерь энергии на гидродинамическое движение, неизбежно возникающее при поглощении лазерного излучения в сверхкритическом веществе вследствие абляции.

В данной работе представлено физическое обоснование использования в качестве вещества малоплотного протяженного конвертора композиционного вещества с плотностью  $\sim 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>. Таким веществом является пористая среда легких элементов с распределенными в ней кластерами тяжелых элементов [7]. Предложение об использовании таких сред в качестве эффективного конвертора базируется на данных современных исследований [8–13], согласно которым лазерное излучение эффективно поглощается без значительного возбуждения гидродинамического движения в пористом веществе с плотностью, превышающей критическую плотность плазмы в несколько раз.

Важным достоинством композиционного состава конвертора является возможность изменения степени конверсии лазерного излучения в рентгеновское в широком диапазоне в зависимости от относительного содержания тяжелых элементов. Широкодиапазонный конвертор позволяет вовлекать в конверсию не всю лазерную энергию, падающую на мишень, а только ту ее часть, которая необходима для выравнивания неоднородности облучения мишени лазерными пучками.

## 2. Генерации собственного излучения в лазерной плазме пористых сред

Наиболее перспективными пористыми средами легких элементов с точки зрения физики применения в мишенях ЛТС и технологии изготовления являются пористые полимеры, пористый бериллий и пористый гидрид бериллия. Уже разработаны технологические методы получения пористых полимеров с плотностью 0.003–0.02 г/см<sup>3</sup> [14, 15] и пористых веществ на основе бериллия с плотностью 0.02–0.05 г/см<sup>3</sup> [16]. Как будет показано ниже, необходимая для эффективной работы поглотителя-конвертора концентрация тяжелых элементов в композиционном веществе должна обеспечивать плотность тяжелого компонента от 0.1 до 1 плотности легкого компонента.

В настоящее время технология изготовления композиционных материалов твердотельной плотности с кластерами тяжелых элементов в широком диапазоне изменения их концентрации, в том числе полимеров с медью [17] и бериллия с золотом [16], достаточно хорошо развита. Создание аналогичных материалов с плотностью менее 0.06 г/см<sup>3</sup> при сравнимых весовых долях легкого и тяжелого компонентов представляет собой сложную задачу, одним из направлений решения которой является использование в качестве пористого вещества гидроксида бериллия [16]. Получены опытные образцы пористого гидроксида бериллия, содержащего распределенные кластеры золота и меди с размерами от нескольких десятков до сотен ангстрем.

В зависимости от структуры пористые среды обычно разделяют на два класса: пены (структуры с закрытыми порами) и трехмерные сетки (структуры с открытыми порами). При известных плотности твердых элементов  $\rho_0$  и средней плотности пористого вещества  $\rho$ , а также в предположении, что все ячейки одинаковы (их ребра имеют размер  $a$ ), второй размер структуры (толщина грани для пен или диаметр нити для трехмерных сеток  $b$ ) составляет для кубических закрытых ячеек  $a(\rho/\rho_0)$  и для открытых ячеек  $a(4\rho/3\pi\rho_0)^{1/2}$ ; при этом число ячеек  $n$  в единице объема равно  $a^{-3}$ . Для ячеек различной формы численные коэффициенты в приведенных формулах несколько меняются, но вид функций остается неизменным.

Пористую структуру композиционных сред образуют твердые частицы, которые представляют собой протяженные объекты легкого вещества, содержащие кластеры тяжелого вещества значительно меньших размеров. Форма кластеров близка к сферической, их размер  $d$  составляет от нескольких десятков до нескольких сотен ангстрем. Число структурообразующих элементов в единице объема есть

$$n_f = \frac{\rho_L}{\Omega_s \rho_{L0}}. \quad (1)$$

Здесь  $\rho_{L0}$  и  $\rho_L$  – плотность легкого вещества в начальном состоянии и средняя плотность легкого вещества в среде;  $\Omega_s$  – объем структурообразующего элемента.

Технологические методы получения рассматриваемых пористых веществ основаны на вспенивании заранее приготовленного композиционного вещества, поэтому распределение кластеров по объему структурообразующих элементов достаточно однородно и с учетом (1) легко получить число кластеров в одном элементе:

$$N_c = \frac{3}{4\pi} \frac{\Omega_s}{d^3} \frac{\rho_H}{\rho_{H0}} \frac{\rho_{L0}}{\rho_L}. \quad (2)$$

Здесь  $\rho_{H0}$  и  $\rho_H$  – плотность вещества кластера в начальном состоянии и средняя плотность тяжелого вещества в среде соответственно. Средние плотности среды и композиционного вещества твердого элемента есть соответственно

$$\rho_a = \rho_L \left(1 + \frac{\rho_H}{\rho_L}\right), \quad \rho_{s0} = \rho_{L0} \left(1 + \frac{\rho_H}{\rho_L}\right). \quad (3)$$

Используя (2), легко получить расстояние между кластерами в твердом элементе:

$$A_c \approx \left(\frac{\Omega_s}{N_c}\right)^{1/3} = d \left(\frac{4\pi}{3} \frac{\rho_{H0}}{\rho_{L0}} \frac{\rho_L}{\rho_H}\right)^{1/3}. \quad (4)$$

В качестве примера рассмотрим параметры пористого бериллия, содержащего кластеры золота. При средней плотности среды  $\rho_a = 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>, размерах структурообразующего элемента  $a = 50$  мкм,  $b = 1$  мкм и размере кластера  $d = 0.01$  мкм параметры твердого элемента композиционной пористой среды составляют: для равных плотностей бериллия и золота  $\rho_H/\rho_L = 1$  плотность элементов легкого вещества (бериллия)  $n_f \sim 10^6$  см<sup>-3</sup>, число кластеров в структурообразующем элементе  $N_f \sim 2 \cdot 10^8$ , среднее расстояние между кластерами  $A_c \sim 0.025$  мкм; при отношении плотностей  $\rho_H/\rho_L = 0.1$  имеем  $n_f \sim 2 \cdot 10^6$  см<sup>-3</sup>,  $N_f \sim 4 \cdot 10^7$ ,  $A_c \sim 0.05$  мкм.

Согласно (4), в интересующем нас диапазоне изменения отношения плотностей тяжелого и легкого веществ от 0.1 до 1 расстояние между кластерами тяжелого вещества в структурообразующем элементе композиционного пористого вещества не превышает четырех-шести размеров кластера, т. е. не превышает 0.1 мкм. Следовательно, можно считать, что лазерное излучение с длинами волн вплоть до ближнего УФ диапазона будет взаимодействовать с таким композиционным твердым элементом пористой среды как со сплошным веществом, имеющим среднюю плотность в начальном состоянии  $\rho_{s0} = \rho_{L0}(1 + \rho_H/\rho_L)$ .

На сегодняшний день в области взаимодействия лазерного излучения с пористым веществом получен ряд важных результатов. Экспериментально зарегистрирована высокая (80–90 %) эффективность поглощения лазерного излучения с длинами волн 1.06 и 0.53 мкм и интенсивностью  $10^{14} - 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> в пористом веществе с плотностью 0.001–0.02 г/см<sup>3</sup>, близкой к критической плотности плазмы и превышающей ее [10, 12]. Высокие коэффициенты поглощения в пористом веществе сверхкритической плотности объясняются достаточно длительным периодом гомогенизации (несколько наносекунд), в течение которого в плазме существуют стохастически-распределенные области с докритической плотностью [8, 13]. В результате поглощение излучения носит объемный характер и происходит на так называемой глубине геометрической прозрачности  $L_a$  частично гомогенизированного вещества, измеряемого в сантиметрах:

$$L_a \approx 15b \left(\frac{\rho_{s0}}{\rho_a}\right)^{1/2}. \quad (5)$$

Для указанных длин волн и интенсивностей лазерного излучения глубина поглощения лазерного излуче-

ния в пористом веществе с плотностью  $10^{-3} - 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup> и со структурообразующими элементами, которые имеют малый размер  $b \sim 0.5 - 1$  мкм, лежит в пределах 600–150 мкм. Другая важная особенность взаимодействия лазерного излучения с пористым веществом состоит в том, что в течение продолжительной начальной стадии взаимодействия, длительность которой близка к длительности полной гомогенизации пористого вещества, не происходит образования интенсивных внешних гидродинамических потоков вещества [9, 11, 12]. По-видимому, до момента окончания гомогенизации пористого вещества большая часть поглощаемой лазерной энергии представляет собой энергию сталкивающихся внутренних потоков и ударных волн.

Наконец, следует отметить высокую скорость переноса поглощаемой лазерной энергии в пористой среде. Измеренная в [9, 12] скорость волны переноса энергии для пористых сред легких элементов с плотностью  $10^{-3} - 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup> составила  $(2-1) \cdot 10^7$  см/с, а для пористых сред той же плотности, содержащих распределенный в ней порошок меди,  $-(5-2) \cdot 10^7$  см/с.

Рассмотрим воздействие лазерного излучения с интенсивностью  $I \leq \lambda^{-2} 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> (длина волны  $\lambda$  измеряется в микрометрах) на слой пористого двухкомпонентного вещества с плотностями легкого компонента  $\rho_L$  и тяжелого компонента  $\rho_H$ . В этих условиях изложенные выше результаты позволяют сформулировать следующую модель образования лазерной плазмы композиционного пористого вещества и генерации собственного излучения.

Излучение поглощается на глубине геометрической прозрачности (5), причем его поглощение отдельным структурообразующим элементом происходит за счет тормозного механизма, без генерации быстрых электронов. На начальной стадии образования плазмы происходит гомогенизация среды, которая сопровождается преобразованием энергии гидродинамических потоков и ударных волн, возникающих при нагреве и разлете твердых элементов пористого вещества, в тепловую энергию плазмы, а также обменом энергией между ионами легких и тяжелых компонентов среды, что приводит к образованию квазиоднородной плазмы с равномерным распределением ионов тяжелых и легких компонентов и однородным распределением температуры.

В рамках приближенной модели мы не будем учитывать влияние на излучательные свойства плазмы процессов макрогомогенизации структурообразующих элементов и микрогомогенизации тяжелого и легкого компонентов вещества. Такое приближение оправданно по следующим причинам. Время, в течение которого кластеры ответственного за излучательные процессы тяжелого компонента, нагреваясь под действием лазерного излучения, сохраняют в процессе разлета внутри твердого элемента легкого компонента высокую плотность ( $\sim 10 - 20$  г/см<sup>3</sup>), близкую к своей начальной плотности, является временем разлета кластера на расстояние в несколько его начальных размеров и равно 0.2–0.5 пс. Время разлета структурообразующего элемента, в течение которого нагретые кластеры тяжелого компонента сохраняют достаточно высокую плотность, близкую к плотности легкого компонента ( $\sim 1$  г/см<sup>3</sup>), составляет 5–10 пс.

В данной работе исследуется физика поглотителя-конвертора термоядерных мишеней с высокими коэффи-

циентами усиления, которым соответствует лазерный импульс длительностью не менее 5–10 нс, по сравнению с которой время жизни плотных нагретых кластеров тяжелого компонента ничтожно мало. Поскольку большая часть поглощенной лазерной энергии в течение стадии гомогенизации содержится в виде энергии макросцилляций плотности плазмы, средняя температура плазмы будет невелика (не более нескольких десятков электронвольт [8, 12]) до тех пор, пока кинетическая энергия хаотических потоков вещества не трансформируется в тепловую энергию. К тому же длительность стадии гомогенизации значительно меньше длительности лазерного импульса.

Описание излучательных свойств многокомпонентной высокотемпературной плазмы является в общем случае сложной проблемой, для решения которой необходимо привлечение численного моделирования. Однако в условиях рассматриваемой задачи, когда вещество представляет собой двухкомпонентную среду с плотностью легкого компонента, незначительно превышающей плотность тяжелого, может быть использован приближенный подход к расчету пробегов излучения. Действительно, лучеиспускательная способность вещества

$$J \propto n_e \sum Z_{ki}^2 n_{ki},$$

где  $Z_{ki}$  и  $n_{ki}$  – заряд и плотность ионов  $k$ -го компонента среды соответственно;  $n_e$  – плотность электронов.

Температура лазерной плазмы, образующейся при воздействии на вещество лазерного излучения с интенсивностью  $10^{13} - 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>, составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч электронвольт. При таких температурах легкие элементы ионизируются полностью, а степень ионизации тяжелых элементов, таких как золото, равна 20–30. В этих условиях можно приближенно считать, что для двухкомпонентного вещества при отношении  $\rho_H/\rho_L \leq 1/4$  сумма  $\sum Z_{ki}^2 n_{ki}$  определяется зарядом ионов и плотностью ионов тяжелого компонента среды.

Таким образом, аргумент зависимости пробега излучения от степени ионизации и плотности двухкомпонентной среды с рассматриваемыми параметрами представляет собой произведение двух множителей

$$\begin{aligned} n_e \sum (Z_H^2 n_{Hi} + Z_L^2 n_{Li}) &\approx \frac{n_e}{n_{Hi}} (Z_H n_{Hi})^2 \\ &= \left[ Z_H \left( 1 + \frac{Z_L \mu_H \rho_H}{Z_H \mu_L \rho_L} \right) \right] (Z_H n_{Hi})^2, \end{aligned}$$

один из которых (второй) содержит только параметры, относящиеся к тяжелому компоненту среды (степень ионизации  $Z_H$  и плотность ионов  $n_{Hi}$ ), а другой учитывает вклад в полное число электронов плазмы ионизации атомов легкого компонента среды.

При «ионизационном» аргументе такого вида с целью приближенных расчетов пробега излучения в двухкомпонентной среде можно воспользоваться известными для ряда тяжелых веществ аппроксимационными выражениями для пробегов излучения, скорректированными с учетом плотности электронов композиционной среды. Наиболее простая аппроксимационная формула имеет степенную форму  $L = L_* T^n / \rho^m$ . На основе такого рода формулы при сохранении равного 2 отношения показате-

лей степеней, с которыми входят в «ионизационный» аргумент множители, содержащие степень ионизации тяжелого компонента и поправку на степень ионизации легкого компонента, выражение для пробега излучения в двухкомпонентной среде можно записать в виде

$$L_T \approx L_* \frac{T^n}{\rho_H^m} \left( 1 + \frac{Z_L \mu_H \rho_L}{Z_H \mu_L \rho_H} \right)^{-m/2}. \quad (6)$$

Здесь  $Z_{H,L}$ ,  $\mu_{H,L}$  – заряд и атомный вес ионов вещества тяжелых и легких элементов соответственно. В качестве тяжелого вещества в работе рассматривается золото со следующими параметрами аппроксимации:  $L_* = 10^{-2}$ ,  $n = 5/2$ ,  $m = 3/2$  [6].

Анализ конверсии лазерного излучения в малоплотном поглотителе-конверторе мишени ЛТС будет проводиться на основе уравнения энергетического баланса сферического слоя двухкомпонентной плазмы, который при облучении лазерным импульсом его внешней поверхности нагревается равномерно по толщине:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{(1+\alpha)K_B}{m_p(\gamma-1)} \left( \frac{Z_H}{\mu_H} \rho_H + \frac{Z_L}{\mu_L} \rho_L \right) T + \beta(\chi)\sigma T^4 \right] \Omega \\ + \frac{c}{4} \beta(\chi)\sigma T^4 (S_i + S_e) \tau = I S_e \tau, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $T$  – температура плазмы;  $K_B$  – постоянная Больцмана;  $m_p$  – масса протона;  $\gamma$  – постоянная адиабаты;  $\sigma = 1.37 \times 10^{14}$  эрг/(см<sup>3</sup>·кэВ<sup>4</sup>);  $c$  – скорость света;  $I, \tau$  – интенсивность и длительность лазерного импульса;  $\Omega = S_e^{3/2} [1 - (S_i/S_e)^{3/2}] / 3(4\pi)^{3/2}$  – объем конвертора;  $S_e = 4\pi R_e^2$  и  $S_i = 4\pi R_i^2$  – площади внешней и внутренней поверхностей конвертора;  $\beta = 2\chi$  при  $\chi \leq 1/2$ ;  $\beta = 1$  при  $\chi \geq 1/2$ ;  $\chi = \Delta/L_T$ ;  $L_T$  – росселандова длина пробега квантов;  $\Delta = R_e - R_i$  – толщина конвертора;  $\alpha$  – отношение гидродинамической и тепловой энергий вещества, которое в течение действия источника энергии может быть выбрано, согласно автомодельному решению для изотермического разлета вещества конечной массы [18], в виде  $\alpha = 3(\gamma-1)(v+1)/2$  для плоской, цилиндрической или сферической геометрии задачи ( $v = 0, 1, 2$ ).

Полная конверсия и конверсия в проходящий поток определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1}{4} \frac{c\beta(\chi)\sigma T^4}{I} \left( 1 + \frac{S_i}{S_e} \right) \\ &\equiv \frac{1}{4} \frac{c\beta(\chi)\sigma T^4}{I} \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\Delta}{R_e} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\eta_f = \eta \left( 1 + \frac{S_e}{S_i} \right)^{-1} \equiv \eta \left( 1 - \frac{\Delta}{R_e} \right)^2 \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\Delta}{R_e} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (9)$$

Уравнение (7) описывает преобразование энергии лазерного излучения, поглощаемой в конверторе (правая часть уравнения), в энергию, содержащуюся внутри конвертора (первое слагаемое левой части уравнения), включая тепловую энергию ионов и электронов, гидродинамическую энергию вещества и энергию теплового излучения, а также в энергию теплового излучения, которое покидает пределы конвертора (второе слагаемое левой части уравнения).

Отметим, что приближение однородно нагретого вещества конвертора, в рамках которого записано уравнение (7), предполагает быстрый перенос энергии – такой, при котором тепловая волна прогревает конвертор по всей его толщине за время, меньшее длительности лазерного импульса:  $\Delta/V_E < \tau$ . Как будет показано ниже, диапазон изменения оптимальных толщин конвертора составляет  $\sim 200-800$  мкм. При скоростях переноса энергии  $V_E \sim (2-5) \cdot 10^7$  см/с (см. выше) приближение однородного нагрева конвертора с указанными выше толщинами справедливо для лазерных импульсов с длительностью не менее 2–3 нс, т. е. справедливо для условий данной задачи.

### 3. «Равновесный» конвертор из композиционного пористого вещества

Необходимым условием высокой эффективности конверсии энергии плазмы в энергию собственного излучения является равновесное состояние излучения, поэтому прежде всего определим параметры и исследуем излучательные свойства оптически-плотного конвертора с толщиной, превышающей  $L_T$ :  $2\Delta > L_T$ . При этом будем полагать, что конвертор является тонким по сравнению с радиусом мишени:  $\Delta < R_c$ . В этих условиях уравнение (7) преобразуется к виду

$$\left[ \frac{2K_B}{m_p(\gamma - 1)} \left( \frac{Z_H}{\mu_H} \rho_H + \frac{Z_L}{\mu_L} \rho_L \right) T + \beta(\chi)\sigma T^4 \right] \frac{\Delta}{\tau} + \frac{c}{2} \beta(\chi)\sigma T^4 = I. \quad (10)$$

Согласно определению степени конверсии (8), для температуры геометрически тонкого «равновесного» конвертора легко получить

$$T_* = \left( \frac{2I}{c\sigma\beta(\chi)} \right)^{1/4} \eta^{1/4}, \quad (11)$$

откуда следует, что температура плазмы «равновесного» конвертора слабо зависит от степени конверсии. В рассматриваемом случае оптически-плотного конвертора ( $\beta = 1$ ), который соответствует высокой степени конверсии ( $\eta \sim 1$ ),

$$T_* = \left( \frac{2I}{c\sigma} \right)^{1/4} \approx 0.148 I_{14}^{1/4}. \quad (12)$$

Здесь  $T_*$  измеряется в кэВ;  $I_{14}$  – интенсивность лазерного излучения, измеряемая в единицах  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. При изменении интенсивности в интервале  $10^{14} - 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> температура плазмы «равновесного» конвертора изменяется от 125 до 240 эВ.

Условие оптически-плотного конвертора с учетом выражений (6) для пробега излучения и (12) для температуры конвертора имеет вид

$$\rho \frac{\rho_H}{\rho_L} \left( 1 + \frac{\rho_H}{\rho_L} \right)^{-1} \left( 1 + \frac{\mu_H}{Z_H} \frac{Z_L}{\mu_L} \frac{\rho_L}{\rho_H} \right)^{1/2} > \frac{I_{14}^{5/12}}{\Delta^{2/3}} 4 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3, \quad (13)$$

где толщина конвертора измеряется в сантиметрах. Далее, сравнивая слагаемые в первом члене уравнения (10) и

используя выражение (12) для температуры плазмы «равновесного» конвертора, легко видеть, что при условии

$$\rho \frac{\rho_H}{\rho_L} \left( 1 + \frac{\rho_H}{\rho_L} \right)^{-1} \left( 1 + \frac{\mu_H}{Z_H} \frac{Z_L}{\mu_L} \frac{\rho_L}{\rho_H} \right) > I_{14}^{3/4} 2.3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3 \quad (14)$$

энергия внутри конвертора содержится преимущественно в виде «материальной» энергии вещества, а при обратном знаке в (14) – в виде энергии излучения.

В качестве конкретного примера вещества конвертора рассмотрим пористый гидрид бериллия  $\text{BeH}_2$ , содержащий кластеры золота. При этом для расчетов полагаем, что  $Z_L/\mu_L = 1/2$ ,  $Z/\mu = 1/8$ . Для такого композиционного вещества при равенстве плотностей тяжелого и легкого компонентов конвертора ( $\rho_H/\rho_L = 1$ ) условие оптически-плотного конвертора с толщиной, например,  $\Delta = 500$  мкм для интенсивности лазерного излучения  $I = 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> выполняется при  $\rho > 1.5 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>, а для  $I = 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> – при  $\rho > 4 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>. Для  $I = 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> условие превышения «материальной» энергии над энергией излучения в «равновесном» конверторе выполняется при  $\rho > 5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>, а для  $I = 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> – при  $\rho > 2.5 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>.

Таким образом, состояние лазерной плазмы композиционного пористого вещества с плотностью, изменяющейся в широком интервале, нижний предел которого близок к  $\rho \sim 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>, и толщиной, близкой к глубине поглощения излучения неодимового лазера и его гармоник, соответствует равновесному состоянию собственного излучения плазмы. При этом распределение внутренней энергии плазмы характеризуется значительным превышением «материальной» энергии над энергией излучения.

Рассмотрим степень конверсии относительно плотного композиционного вещества с плотностью, превышающей указанный выше предел, имея в виду то обстоятельство, что пробег излучения быстро уменьшается с ростом плотности плазмы, поэтому возможность создания более компактного конвертора связана с использованием вещества конвертора относительно высокой плотности. Пренебрегая в уравнении (10) радиационной составляющей внутренней энергии конвертора и используя соотношение (11), получаем уравнение для определения степени конверсии относительно плотного, геометрически-тонкого конвертора в зависимости от параметров конвертора и лазерного импульса:

$$\varphi \frac{\rho \Delta}{\tau I_{14}^{3/4}} \eta^{1/4} + \eta = 1. \quad (15)$$

Здесь длительность лазерного импульса  $\tau$  измеряется в нс;  $\rho$  – в г/см<sup>3</sup>,  $\Delta$  – в см;

$$\varphi = 4.2 \cdot 10^2 \left( \frac{Z_H}{\mu_H} + \frac{Z_L}{\mu_L} \frac{\rho_L}{\rho_H} \right) \left( 1 + \frac{\rho_L}{\rho_H} \right)^{-1}.$$

Из уравнения (15) следует, что конверсия лазерного излучения в собственное излучение плазмы, близкая к 100 % для конвертора из пористого бериллия с равновесным содержанием кластеров золота, имеет место при

$$\rho \Delta < \tau I_{14}^{3/4} 7 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^2. \quad (16)$$

Согласно (16), для лазерных импульсов наносекунд-

ной длительности при интенсивности  $10^{14} - 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> оптическая толщина  $\rho\Delta$  эффективного конвертора из бериллия с равновесным содержанием кластеров золота не должна превышать  $\sim 10^{-2}$  г/см<sup>2</sup>. При толщине конвертора в несколько сотен микрометров плотность конвертора  $10^{-3} - 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>, отвечающая эффективному поглощению излучения неодимового лазера, удовлетворяет этому условию с большим запасом.

#### 4. Эффективность конверсии пористого композиционного поглотителя

Найдем теперь области изменения параметров пористого композиционного конвертора, соответствующие различным режимам преобразования лазерного излучения в рентгеновское, и проведем расчет эффективности конверсии для конкретного лазерного импульса, характеристики которого близки к параметрам лазерного импульса будущих мегаджоульных лазерных установок. Расчеты выполнены для конвертора из пористого бериллия с равновесным содержанием кластеров золота и импульса неодимового лазера с интенсивностью  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> и длительностью 5 нс.

На рис. 1 показаны области параметров конвертора, соответствующие различным режимам преобразования лазерного излучения в рентгеновское и рассчитанные на основании уравнения (10). Кривая 1 соответствует равенству толщины слоя конвертора глубине поглощения лазерного излучения в пористом веществе,  $\Delta = L_a$ . Глубина поглощения рассчитывалась по формуле (5) с учетом выражений (3) для плотностей композиционного конвертора при малом размере структурообразующего элемента  $b = 1$  мкм. Кривая 2 соответствует равенству удвоенной толщины конвертора и длины пробега излучения, рассчитанной для температуры плазмы «равновесного» конвертора (12).

В области выше кривой 2, где  $\chi = \Delta/L_T > 1/2$ , излучение конвертора можно считать равновесным с эффективной температурой, равной  $T_*$ . В области ниже кривой 2 отношение  $\chi = \Delta/L_T < 1/2$  и излучение не является равновесным, его эффективная температура меньше температуры плазмы. Область параметров, расположенная выше кривой 3, отвечает отношению энергии вещества (тепловой и гидродинамической) к энергии, преобразо-

ванной в поток собственного излучения плазмы,  $W_m/W_r > 0.1$ , а область параметров, расположенная ниже этой линии, – отношению  $W_m/W_r < 0.1$ .

Анализ данных, представленных на рис.1 позволяет определить границы двух характерных областей параметров пористого композиционного конвертора, которые соответствуют различным режимам преобразования лазерного излучения в рентгеновское. Первая область параметров ( $10^{-2} < \rho < 4 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>,  $0.02 < \Delta < 0.1$  см) отвечает высокой степени преобразования лазерного излучения в рентгеновское со степенью конверсии не менее 0.9. Эта область параметров соответствует равновесному излучению оптически-плотной плазмы конвертора.

Увеличение плотности и толщины конвертора по сравнению с верхними границами областей приводит к уменьшению степени конверсии в связи с ростом тепловой и гидродинамической энергии вещества конвертора. Уменьшение плотности и толщины конвертора по сравнению с нижними границами областей вызывает уменьшение степени конверсии в связи с увеличением прозрачности конвертора. Отметим, что превышение толщиной конвертора глубины поглощения лазерного излучения в этой области параметров не должно оказывать значительного влияния на динамику и степень конверсии, поскольку лучистая теплопроводность в оптически-плотной плазме приводит к быстрому переносу поглощенной лазерной энергии по всей массе конвертора.

Вторая область с параметрами  $10^{-3} < \rho < 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>,  $0.01 < \Delta < 0.06$  см лежит вне области оптически-плотной плазмы и отвечает более низкой эффективности конверсии, которая может изменяться с изменением параметров конвертора в широких пределах.

На рис.2 представлены зависимости полной конверсии (8), рассчитанной на основании уравнения (10) для указанных выше параметров лазерного импульса, от толщины конвертора при разных средних плотностях пористого бериллия с равновесным содержанием золота  $\rho_a = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  и  $5 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>. Для толщин конвертора свыше 500 мкм эффективность конверсии высока, более 0.8, и слабо чувствительна к изменению плотности. При толщинах конвертора 800–1000 мкм степень конверсии близка к единице. При уменьшении толщины конвертора по сравнению с  $\Delta = 400 - 500$  мкм степень конверсии падает, причем тем быстрее, чем меньше плотность вещества конвертора. При изменении плотности и толщины конвертора в пределах  $5 \cdot 10^{-3} < \rho < 5 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup> и  $200 < \Delta < 400$  мкм степень конверсии изменяется от  $\sim 90$  до  $\sim 60$  %.

Представленные результаты позволяют сделать следующее заключение относительно перспектив использования термоядерной мишени с малоплотным поглотителем-конвертором в экспериментах по зажиганию. В экс-

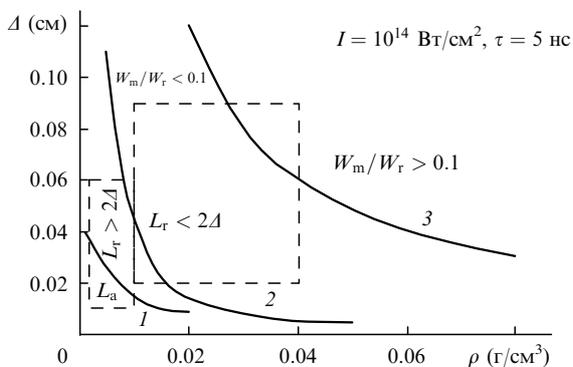


Рис.1. Области параметров конвертора, соответствующие различным режимам преобразования лазерного излучения в собственное излучение плазмы:

1 – толщина слоя конвертора равна глубине поглощения лазерного излучения  $\Delta = L_a$ ; 2 – граница области оптически-плотного конвертора; 3 – отношение энергии вещества  $W_m$  к энергии, преобразованной в поток собственного излучения плазмы  $W_r$ , равно 0.1.

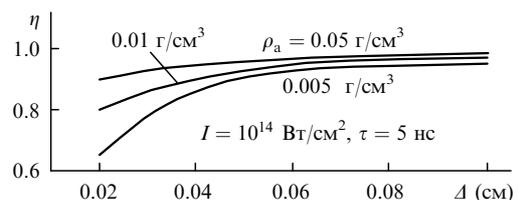


Рис.2. Зависимости полной конверсии  $\eta$  от толщины конвертора из пористого бериллия с равновесным содержанием золота при разных средних плотностях конвертора  $\rho_a$ .

периментах по зажиганию на установке NIF [3] при прямом облучении планируется использование сферических термоядерных капсул радиусом около 1 мм. Согласно данным рис.1, поглотитель-конвертор из пористого бериллия с кластерами золота, обеспечивающий высокую степень конверсии лазерного излучения в проходящий поток рентгеновского излучения, должен иметь толщину меньше указанного радиуса термоядерной капсулы при плотности не менее  $10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>. Согласно данным рис.2, поглотитель-конвертор с плотностью  $10^{-2}$  г/см<sup>3</sup> и толщиной 600–800 мкм способен обеспечить полную конверсию, близкую к 100 %, и степень конверсии в проходящий поток рентгеновского излучения (см. (9)) около 30 %, что при более простом, прямом способе облучения приводит к воздействующей на мишень энергии, в 2–3 раза большей, чем в случае непрямого мишени.

## 5. Заключение

Таким образом, использование широкодиапазонного поглотителя-конвертора из композиционного вещества, представляющего собой пористую среду легких элементов с распределенными в ней кластерами тяжелых элементов, позволяет изменять условия сжатия вещества в мишенях ЛТС в самых широких пределах – от «прямого» сжатия до «непрямого». В последнем случае это дает возможность значительно снизить энергию лазерного излучения, необходимую для зажигания термоядерной реакции.

1. Nuckols J. *Physics Today*, **9**, 25 (1982).
2. Nakai S. *Nuclear Fusion*, **30**, 1779 (1990).
3. Lindl J. *Preprint UCRL-JC-119015 L-19821-1* (Livermore, USA, 1995).
4. Eliezer E., Honrubia J., Velarde G. *Phys.Letts A*, **166**, 249 (1995).
5. Бессараб А.В., Гайдаш В.А., Долголёва Г.В. и др. *ЖЭТФ*, **102**, 1800 (1992).
6. Вергунова Г.А., Розанов В.Б. *Квантовая электроника*, **19**, 263 (1992).
7. Гуськов С.Ю., Меркульев Ю.А. *Препринт ФИАН № 56* (М., 1999).
8. Гуськов С.Ю., Розанов В.Б. *Квантовая электроника*, **24**, 715 (1997).
9. Бугров А.Э., Бурдонский И.Н., Гаврилов В.В. и др. *ЖЭТФ*, **111**, 903 (1997).
10. Бугров А.Э., Бурдонский И.Н., Гаврилов В.В. и др. *ЖЭТФ*, **115**, 805 (1999).
11. Caruso A., Gus'kov S.Yu., Demchenko N.N. et al. *J. Russian Laser Research*, **18**, 464 (1997).
12. Гуськов С.Ю., Карузо А., Розанов В.Б., Странгио К. *Квантовая электроника*, **30**, 191 (2000).
13. Gus'kov S.Yu. *Preprint FIAN No 49* (М., 1999).
14. Nazarov W., McGivern. *Fusion Technology*, **38**, 110 (2000).
15. Borisenko N.G., Gromov A.I., Mercul'ev Yu. et al. *Fusion Technology*, **38**, 115 (2000).
16. Borisenko N.G., Dorogotovtsev V.M., Gromov A.I. et al. *Fusion Technology*, **38**, 161 (2000).
17. Borisenko N.G., Mercul'ev Yu. A. In: *Laser thermonuclear targets and superdurable microballoons* (A.I.Isakov, ed.) (N.Y., Nova Science Publishers, 1996, p. 35).
18. Имшенник В.С. *ДАН*, **131**, 1287 (1960).