

ВЛИЯНИЕ ЗВУКОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ НА РАБОТУ ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

INFLUENCE OF THE SOUND PROCESSES IN ACTIVE MEDIUM ON THE GAS NUCLEAR PUMPED LASER OPERATION

П. П. Дьяченко, Н. П. Дьяченко, Е. Д. Поletaев
P. P. Dyachenko, N. P. Dyachenko, E. D. Poletaev

АО «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»
JSC “State Scientific Centre of Russian Federation –
Institute for Physics and Power Engineering named A. I. Leypunsky”

Проведено сравнительное экспериментальное исследование генерационных характеристик лазера на переходе атомарного ксенона с длиной волны 2,03 мкм при прямой накачке осколками деления урана активной среды в виде смеси газов He, Ar и Xe в цилиндрических активных элементах двух типов, отличающихся диаметром и толщиной уранового покрытия. Показано, что уменьшение диаметра и толщины покрытия активного элемента примерно в 3 раза, соответственно, приводит к увеличению эффективности лазера по энергии в 1,5 раза. Рассмотрено одно из возможных объяснений этого эффекта, основанное на предположении о наличии источника внутренних потерь лазерного излучения в активной среде за счет рассеяния на радиальных звуковых волнах плотности газа, возбуждаемых импульсом накачки.

Comparative experimental study of the generation characteristics of the laser on the xenon atomic transition with wave length 2,03 μ m during direct pumping of the active media in the form of He, Ar, Xe gas mixture by the uranium fission fragments was performed for two types of active elements with different diameter and uranium coating thickness. It was shown that decrease of the active element diameter and uranium coating thickness about 3 times results in increase of laser efficiency about 1.5 times. One from possible explanations of this effect based on assumption about existence of the intrinsic losses source in active medium through laser radiation scattering on the gas density radial sound waves induced by pumping pulse had been observed.

Введение

Лазерно-активный элемент (ЛАЭЛ) является одним из наиболее важных элементов реакторно-лазерной установки [1]. Именно в нем происходит преобразование энергии деления ядер в энергию лазерного излучения. Поэтому его характеристики в значительной мере определяют лазерные характеристики установки в целом. Известны два типа ЛАЭЛа: с круглым [1] и прямоугольным [2] поперечным сечением. Цилиндрический ЛАЭЛ, используемый, например, в [1], представляет собой тонкостенную трубу из нержавеющей стали длиной 2,5 м, наружным диаметром 49 мм с толщиной стенки 0,5 мм, покрытую изнутри уран-молибденовым сплавом толщиной 5 мкм (содержание Мо по массе 3 %, обогащение урана по ^{235}U – 90 %), герметично закрытую с торцов оптическими окнами. При использовании He-Ar-Xe среды в таком элементе на переходе атомарного ксенона с длиной волны 2,03 мкм была получена энергия генерации около 1,5 Дж/л при эффективности преобразования энергии осколков деления, вложенной в газ, в энергию лазерного излучения на уровне 0,8–1,7 % [3, 4].

В работе [5] при использовании цилиндрического ЛАЭЛа с несколько другими параметрами были получены более высокие характеристики такого лазера: удельный энергосъем лазерного излучения 30 Дж/л и КПД преобразования энергии осколков деления в энергию генерации 3 %. При этом ЛАЭЛ представлял собой алюминиевую трубку длиной 1,5 м с внутренним диаметром 19,5 мм и толщиной стенки 1,4 мм, покрытую изнутри слоем окиси-закиси урана (обогащение по ^{235}U – 90 %) толщиной 3 мг/см².

В этой связи представляет интерес провести прямое сравнение генерационных характеристик лазера с использованием активного элемента этих двух типов в одинаковых (по возможности) условиях эксперимента: одинаковом потоке нейтронов, при использовании одной и той же аппаратуры, одинаковом методе обработки данных и т. д. Данная работа посвящена таким исследованиям.

Экспериментальный метод

Экспериментальные исследования были выполнены в ГНЦ РФ-ФЭИ на двухзонном импульсном реакторе Барс-6 [1]. Схема эксперимента показана на рис. 1. Активный элемент (кювета) помещался в осевую полость диаметром 50 мм облицованного снаружи листовым кадмием толщиной 1 мм цилиндрического полиэтиленового замедлителя нейтронов наружным диаметром 160 мм и длиной 2,5 м. Расстояние между осью замедлителя и линией, проходящей через центры активных зон (АЗ) реактора, составляло 24,5 см. Расстояние между центрами АЗ – 70 см.

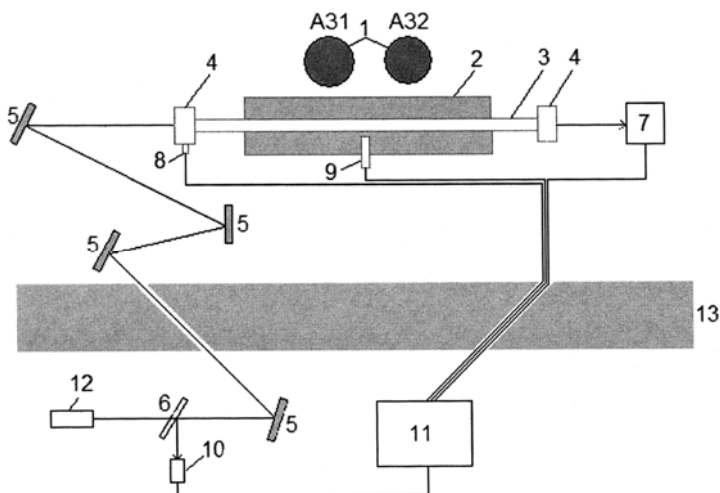


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – активные зоны реактора Барс-6, 2 – замедлитель нейтронов, 3 – ЛАЭЛ (кювета), 4 – торцевой юстировочный узел, 5 – плоское поворотное зеркало, 6 – светоделительная пластина, 7 – калориметр КДМ-3, 8 – датчик давления ДМИ-2-3, 9 – вакуумная камера деления КНТ-5, 10 – фотодиод PD-24, 11 – система регистрации сигналов на базе персонального компьютера, 12 – юстировочный лазер, 13 – биологическая защита реакторного бокса

В первых двух опытах исследовался ЛАЭЛ № 1, аналогичный упоминавшемуся во введении штатному ЛАЭЛУ лазерного блока стенда «Б» [1]. Отличие состояло лишь в том, что его длина была равна не 2,5 м, а 2,8 м и на торцах были установлены не оптические окна, а торцевые юстировочные узлы с зеркалами внутреннего резонатора.

В двух других опытах в замедлитель помещался ЛАЭЛ № 2, аналогичный примененному в работе [5]. Он представлял собой алюминиевую трубку с внутренним диаметром 15,3 мм, покрытую внутри слоем окиси-закиси урана толщиной $3,0 \text{ мг/см}^2$ (обогащение по ^{235}U – 90 %), установленную на оси точно такой же, как в предыдущем случае, трубы с юстировочными узлами резонатора, но без уранового покрытия. Трубка состояла из пяти секций. Две наружных секции имели длину 49 см. Три внутренних – 45 см. Соосность секций обеспечивалась специальным тонкостенным дистанционирующим каркасом из дюралюминия. Длина промежутков между секциями составляла 1 см.

Каждая из секций изготавливалась следующим образом. На полоску алюминиевой фольги толщиной 150 мкм, шириной 48 мм и длиной 45(49) см методом окрашивания (painting method) [6] наносился слой окиси-закиси урана толщиной $3,0 \text{ мг/см}^2$. Контроль за толщиной и равномерностью покрытия в процессе нанесения осуществлялся методом взвешивания, а также сравнением спектров осколков деления, измеренных методом [7], с эталонным из работы [7]. Затем с помощью специального устройства фольга сворачивалась в трубку (покрытием внутрь) внутренним диаметром 15,3 мм и длиной соответственно 45 или 49 мм. Далее полученная трубка с небольшой продольной щелью ($<1 \text{ мм}$) вставлялась в сплошную охранную трубку из дюралюминия соответствующей длины диаметром 16 мм и толщиной стенки 0,2 мм, изготовленную на прокатном стане. По торцам фольга прижималась к охранной трубке распорными кольцами с внутренним диаметром 15 мм и шириной 3 мм. Охранная трубка и распорные кольца необходимы для того, чтобы предотвратить деформацию фольги при скачке давления газа во время импульса накачки, который может достигать значений в несколько бар.

Результаты эксперимента

| № ₀ | № _л | $N_f, 10^{17}$ A31; A32 | Состав He:Ag:Xe среды, P , бар | Параметры зеркал резонатора $T_B, \%$; $R_B, \text{м}$ $T_r, \%$; $R_r, \text{м}$ | ΔP_y , бар | Q , Дж | E_d , Дж | $\varepsilon_E, \%$ |
|----------------|----------------|----------------------------|---|---|---------------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 1 | 1 | 1,07; 1,05 | 280:70:1 1,03 | 22; ∞ 0,2; ∞ | 0,67 $\pm 0,07$ | 520 ± 50 | 5,4 $\pm 0,5$ | 1,0 $\pm 0,2$ |
| 2 | 1 | 1,10; 1,11 | 280:70:1 1,03 | 28; 10 0,2; ∞ | 0,70 $\pm 0,07$ | 550 ± 50 | 5,5 $\pm 0,5$ | 1,0 $\pm 0,2$ |
| 3 | 2 | 1,16; 1,12 | 700:100:1 4 | 22; ∞ 0,2; ∞ | 0,094 $\pm 0,01$ | 73 ± 7 | 1,12 $\pm 0,1$ | 1,5 $\pm 0,3$ |
| 4 | 2 | 1,11; 1,10 | 700:100:1 4 | 22; ∞ 0,2; ∞ | 0,090 $\pm 0,01$ | 70 ± 7 | 1,10 $\pm 0,1$ | 1,6 $\pm 0,3$ |

№₀ – номер опыта, №_л – номер ЛАЭЛа, N_f – число делений в импульсе реактора, P – давление газовой смеси. $T_B, R_B; T_r, R_r$ – пропускание и радиус кривизны выходного и глухого зеркал, соответственно, ΔP_y – установившийся скачок давления, Q – полный энерговклад в газ, E_d – энергия лазерного излучения, ε_E – эффективность лазера по энергии. Погрешности, приведенные в таблице, получены в дополнительном эксперименте из разброса серий измерения известных значений соответствующих величин датчиком давления и калориметром.

Система откачки и наполнения кюветы газовой смесью располагалась в измерительном зале и соединялась с ней двумя трубопроводами из нержавеющей стали длиной ~15 м и внутренним диаметром 8–10 мм. Она состояла из форвакуумного насоса, снабженного ловушкой с жидким азотом, баллонов с соответствующими газами марки «А» и баллона – смесителя, в котором готовилась необходимая смесь.

Перед каждым импульсом кювета вакуумировалась до остаточного давления 10^{-3} тор и наполнялась соответствующей газовой смесью. Парциальные составы смеси приведены в таблице. Во всех случаях изучалась генерация на атомарном переходе ксенона с длиной волны 2,03 мкм. Параметры зеркал резонатора для каждого из опытов приведены в таблице. Энергия лазерного излучения регистрировалась широкоапертурным калориметром КДМ-3, установленным в реакторном боксе на расстоянии 70 см от выходного зеркала. Форма импульса генерации измерялась фотодиодом PD-24, расположенным в измерительном зале. Форма импульса накачки измерялась вакуумной камерой деления КНТ-5, установленной в замедлителе. Энергия импульса накачки определялась по данным датчика давления ДМИ-2-3, установленного в одном из торцевых узлов кюветы.

Сигналы с детекторов после соответствующего усиления и оцифровки с помощью специального кодировщика записывались в память персонального компьютера. Туда же вводились полученные предварительно данные, необходимые для калибровки детекторов, в частности калориметра и датчика давления.

Результаты и обсуждение

Для проведения эксперимента в работе было выполнено четыре пуска реактора. Основные параметры импульсов реактора и ЛАЭЛов, а также импульсов накачки и генерации, зарегистрированных соответствующими детекторами, приведены в таблице и показаны на рис. 2–4. Следует заметить, что для парциального состава активных сред ЛАЭЛов и их общего давления, а также для пропускания зеркал резонаторов выбраны значения, близкие к тем, которые в работах [3–5] были рекомендованы в качестве наиболее оптимальных.

Энерговклад Q осколков деления в активную среду ЛАЭЛов определялся по формуле из работы [8]

$$Q[\text{Дж}] = 0,154 \left[\text{Дж} / \text{бар} \cdot \text{см}^3 \right] \cdot \Delta P_y [\text{бар}] \cdot V [\text{см}^3]$$

где ΔP_y – установившийся скачок давления в кювете после действия импульса накачки, V – объем кюветы. Объем кюветы, как уже отмечалось, для обоих ЛАЭЛов одинаков и составляет 5066 см^3 . Значение величины ΔP_y определялось по данным датчика ДМИ-2-3 в приближении экспоненци-

ального закона остывания газа в кювете. Экспериментальные данные ДМИ-2-3-датчика (см. рис. 2, 3) аппроксимировались экспоненциальными зависимостями (на рис. 2, 3 показаны пунктирными линиями). При этом постоянные времени и предэкспоненциальные множители определяли методом наименьших квадратов по интервалу времени 20–100 мс, к началу которого, как видно из рис. 2,3, звуковые процессы в значительной мере затухают и их влиянием на соответствующие зависимости можно пренебречь. В качестве установившегося скачка давления ΔP_y принимали значение экспоненты при $t = 1$ мс. Следует заметить, что отношение энерговкладов в активную среду исследованных ЛАЭЛов, полученных описанным выше способом, равное $\sim 7,5$, удовлетворительно согласуется с оценкой значения соответствующего отношения, основанной на известном содержании урана-235 в этих элементах (34,5 и 2,56 г) и эффективности покрытий (10 и 19 %), измеренных в работе [7]. Нетрудно показать, что в этом случае также получается значение, близкое к 7,5, что подтверждает корректность принятой в работе методики определения энерговклада.

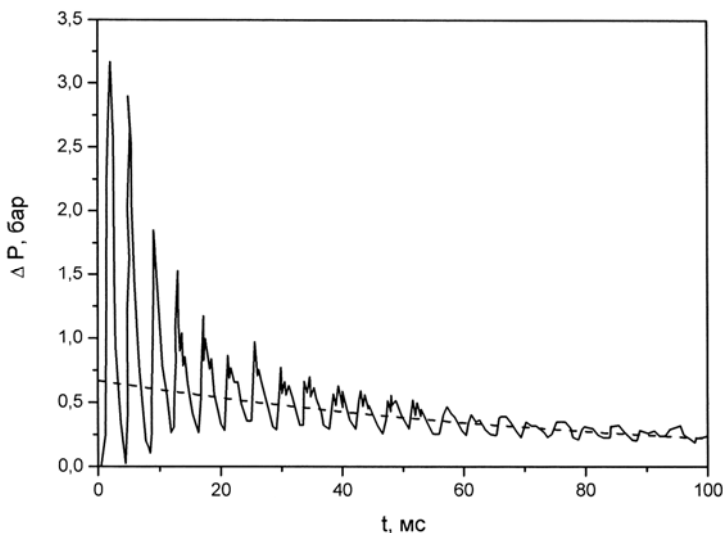


Рис. 2. Зависимость от времени t скачка давления ΔP газа в кювете, возбуждаемого импульсом накачки, в опыте № 1. Сплошная кривая – экспериментальные данные. Пунктирная линия – функция $\Delta P(t)$ [бар] = $0,68 \exp(-t[\text{мс}]/90)$

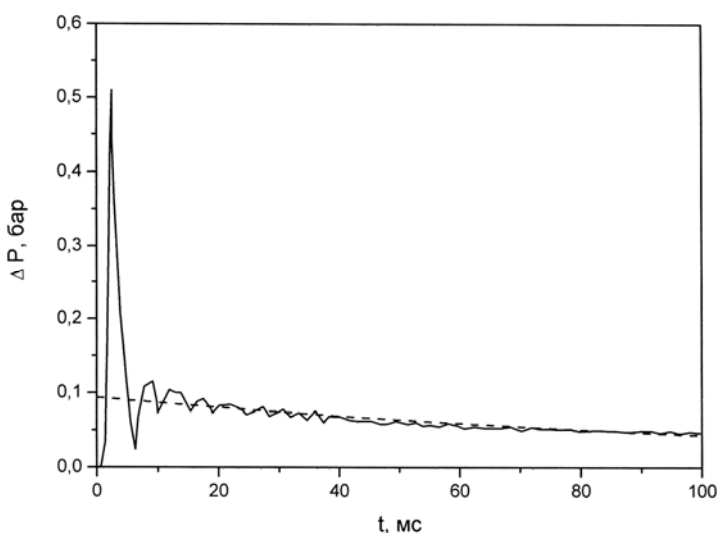


Рис. 3. Зависимость от времени t скачка давления ΔP газа в кювете, возбуждаемого импульсом накачки, в опыте № 3. Сплошная кривая – экспериментальные данные. Пунктирная линия – функция $\Delta P(t)$ [бар] = $0,095 \exp(-t[\text{мс}]/130)$

Из таблицы следует, что эффективность лазера на основе ЛАЭЛа № 2 в два раза меньше, чем было получено в работе [5]. Возможно это связано с тем, что условия нашего эксперимента несколько отличаются от условий эксперимента [5]. Действительно, в нашем случае внутренний диаметр активного элемента 15,3, а не 19,5 мм, между секциями имеются промежутки и энергоклад примерно в пять раз меньше, чем в работе [5]. Однако эти отличия едва ли могут служить причиной наблюдаемого разногласия. Так сегодня нет оснований ожидать, что уменьшение диаметра активного элемента на 20 % может существенно повлиять на эффективность лазера. Контрольный опыт с активным элементом со сдвинутыми вплотную секциями, выполненный в нашей работе, показал, что наличие промежутков между ними не приводит к заметному изменению эффективности генерации. Что касается разницы в энергокладе, то согласно существующим в настоящее время представлениям его увеличение может привести лишь к уменьшению эффективности лазера.

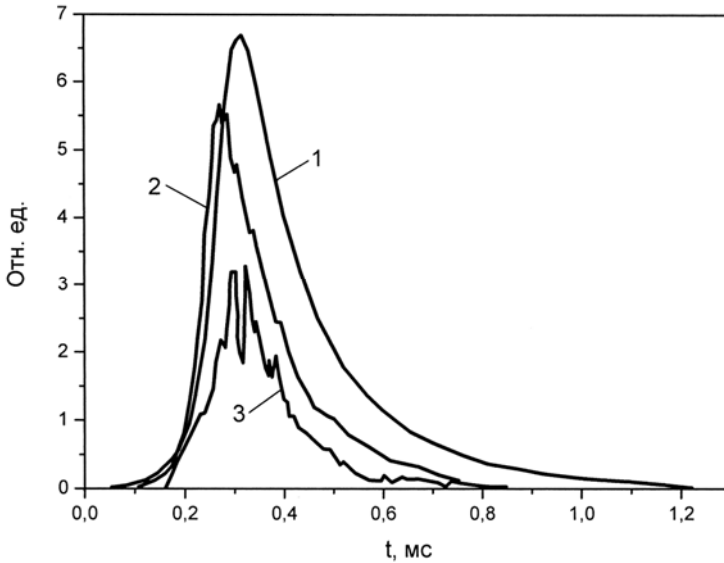


Рис. 4. Импульсы накачки и генерации. 1 – импульс накачки, 2 – импульс генерации в опыте №1, 3 – импульс генерации в опыте № 3

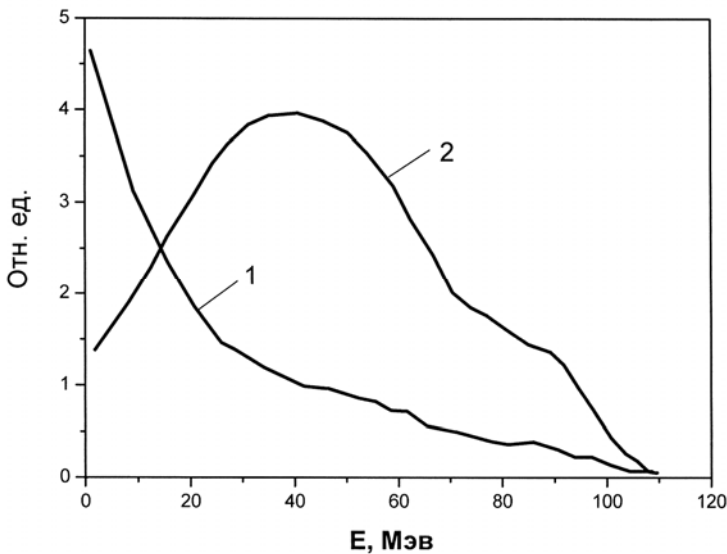


Рис. 5. Энергетические спектры осколков деления, вылетающих из урановых покрытий. Кривая 1 – ЛАЭЛ № 1, кривая 2 – ЛАЭЛ № 2

Вместе с тем из таблицы видно, что эффективность лазера с активным элементом № 1 примерно в полтора раза меньше, чем с элементом № 2. На первый взгляд это неожиданный результат. Дело в том, что во втором случае плотность активной среды и удельный энерговыдел в четыре и полтора раза больше, чем в первом. Это должно приводить к большему столкновительному тушению верхнего лазерного уровня. Поэтому эффективность лазера во втором случае должна быть меньше, чем в первом, а не больше, как наблюдается в эксперименте.

Качественно наблюдаемый эффект можно объяснить, если предположить существование в активном элементе источника внутренних потерь лазерного излучения, связанного с его рассеянием на радиальных звуковых волнах плотности среды, возникающих во время импульса накачки из-за радиальной неоднородности энерговыдела. Следует подчеркнуть, что возникновение звуковых процессов в ЛАЭЛе в результате действия импульса накачки, в частности продольных звуковых волн, убедительно демонстрируется экспериментальными данными датчика давления (см. рис. 2, 3). Для гелия характерное время прохождения радиальной звуковой волны расстояния, равного диаметру активного элемента № 1, например, составляет около 50 мкс. Это означает, что за время действия импульса (~500 мкс) она успеет сделать около десяти таких проходов, что при соответствующей амплитуде волны может привести к заметному уменьшению потока излучения за счет рассеяния. Очевидно, что амплитуда такой волны будет определяться степенью радиальной неоднородности энерговыдела. Спектры осколков деления, вылетающих из покрытий, приведенные на рис. 5 [7], показывают, что радиальная неоднородность энерговыдела в активном элементе № 1 будет значительно больше, чем в элементе № 2. Следовательно, потери излучения в нем за счет обсуждаемого эффекта будут больше, а эффективность лазера меньше, что и наблюдается в эксперименте.

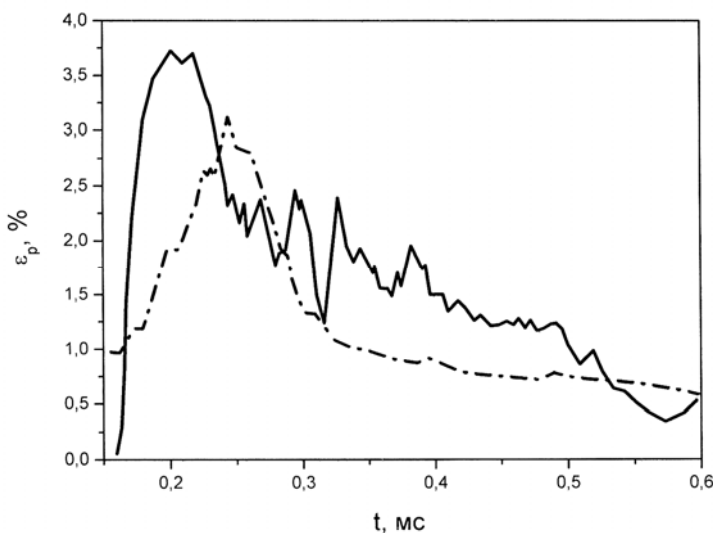


Рис. 6. Зависимость мгновенной эффективности лазера ε_p (по мощности) от времени t .

Штрих-пунктирная кривая – опыт № 1, сплошная кривая – опыт № 3.

Предлагаемая гипотеза позволяет также качественно понять характер зависимости от времени мгновенной эффективности генерации (по мощности) в процессе импульса накачки, показанной на рис. 6, а также разницу в форме переднего и заднего фронтов импульса генерации и значениях мощности накачки, соответствующих порогу и срыву генерации (см. рис. 4). Эти эффекты можно трактовать, как результат роста обсуждаемых потерь за счет увеличения неравномерности плотности среды по сечению активного элемента, вызываемого радиальными звуковыми процессами, при росте энерговыдела во время импульса накачки.

Заключение

Сравнительное экспериментальное исследование генерационных характеристик газового лазера с накачкой осколками деления урана на основе цилиндрического активного элемента двух типов показало, что при уменьшении диаметра ЛАЭЛа и толщины уранового покрытия примерно

в три раза эффективность генерации возрастает в полтора раза. Этот результат трудно объяснить в рамках существующих представлений о кинетике газового лазера с ядерной накачкой. Его причиной может служить рассеяние лазерного излучения в активном элементе на радиальных звуковых волнах плотности среды, амплитуда которых с ростом толщины уранового покрытия и диаметра активного элемента увеличивается.

Вместе с тем эффективность лазера с активным элементом, близким по параметрам к использованному в работе [5], согласно нашим данным, оказалась в два раза ниже. Причины этого пока не ясны. Для их выяснения необходимы дальнейшие исследования.

В заключение авторы считают своим долгом выразить признательность А. А. Суворову и В. А. Жеребцову за интерес к работе и полезные обсуждения, Ю. А. Дюжову и И. А. Денежкину за помощь в проведении эксперимента на реакторе, Н. Н. Кожемяко за организацию работ по изготовлению тонкостенных охранных трубок, В. И. Мешакину, С. П. Степанову и А. И. Чусову за помощь в изготовлении урановых покрытий, а также персоналу стенда «Б» за бесперебойную работу реактора Барс-6.

Список литературы

1. Дьяченко П. П., Фокин Г. Н. Запальный реактор и параметры импульса накачки в реакторно-лазерной системе. Атомная энергия, 2012, т. 112, вып.5, с. 277–282.
2. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
3. Дьяченко П. П., Дюжов Ю. А., Полетаев Е. Д., Смольский В. Н. Изучение генерационных характеристик лазерно-активных элементов с He-Ag-Xe средой для различных типов урановых покрытий // В сб.: Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. Обнинск, ФЭИ, 2007. Т. 1. С. 232–237.
4. Дюжов Ю. А., Кухарчук О. Ф., Полетаев Е. Д. и др. Лазерные характеристики смесей Ag – Xe и He – Ag – Xe при накачке осколками деления. – Квантовая электроника, 2010, т. 40, № 1, С. 11–18.
5. Загидулин А. В., Бочков А. В., Мироненко В. В., Софиенко Г. С. 500 – джоульный лазер с ядерной накачкой // Письма в ЖТФ, 2012, т. 38, вып. 23, с. 31–39.
6. Glover K. M., Borrell P. A method for the preparation of thin films of plutonium and uranium // J. Nuclear Energy, 1955, v. 1, p. 214–217.
7. Дьяченко П. П., Дюжов Ю. А., Кухарчук О. Ф., Полетаев Е. Д. Эффективность урановых покрытий в цилиндрическом лазерно-активном элементе // Атомная энергия, 2007. Т. 102, Вып. 4. С. 249–253.
8. Дьяченко Н. П., Дьяченко П. П., Зродников А. В., Чанов В. П. Измерение импульсного энергоклада осколков деления в газовую среду по скачку давления. Препринт ФЭИ – 2256, 1992.