

07;12

500-джоульный лазер с ядерной накачкой

© А.В. Загидулин, А.В. Бочков, В.В. Мироненко, Г.С. Софиенко

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск
E-mail: dep5@vniitf.ru

Поступило в Редакцию 5 июня 2012 г.

Создан 520 J импульсный газовый лазер (лазерный модуль) с накачкой продуктами деления ядер урана, работающий на атомарном переходе ксенона $5d[3/2]_1 \rightarrow 6p[3/2]_1$, с длиной волны $2.03 \mu\text{m}$. Эксперименты проводились на комплексе „БАРС-5+РУН-2“ (Быстрый аperiodический реактор самогасящийся и Реакторный умножитель нейтронов). Удельная энергия лазерного излучения, полученная в экспериментах, составила $\sim 32 \text{ J/dm}^3$ при КПД $\sim 3\%$ (отношение выходной энергии импульса лазерного излучения к энергии, переданной газовой среде осколками делений).

Одним из способов возбуждения активной лазерной среды является накачка продуктами ядерных реакций. Прямое преобразование энергии осколков деления ядер урана в лазерное излучение дает возможность создать лазер с высокими энергетическими характеристиками (1 MJ и выше). Такой лазер не будет нуждаться в мощном источнике энергии, так как сам будет являться энергетической установкой, имеющей возможность самоподдерживающейся (цепной) ядерной реакции. Исследования лазеров с ядерной накачкой велись в США и СССР начиная с 60-х годов, сейчас ведутся в России и в Китае. Известны проекты мощных лазеров [1]: „ЛИРА“ (Россия, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск), „ЛМ-16/ИКАР-500“ (Россия, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров), „ОКУЯН/БАРС-6“ (Россия, ГИЦ-ФЭИ), „FALCON“ (США, SNL, Albuquerque).

Передовые достижения других лабораторий в области лазеров с ядерной накачкой [1]:

— комплекс FLE-2 на реакторе ACRR+FREC-2 с энергией импульса лазерного излучения $\sim 300 \text{ J}$ при длительности $\sim 0.2 \text{ s}$ (U.S.A., Sandia National Laboratories, Albuquerque);

— лазерный модуль ЛМ-4 на реакторе „БИГР“ с энергией импульса лазерного излучения 150 J при длительности 0.98 s (Россия, ВНИИЭФ, Саров).

В настоящее время в РФЯЦ–ВНИИТФ ведутся работы по созданию мощного реактора–лазера. Одним из этапов, на основании работ [2] и [3], было создание лазерного модуля с энергией импульса лазерного излучения 500 J. Поток нейтронов для деления ядер урана в лазерном модуле обеспечивал комплекс „БАРС-5+РУН-2“ [4].

В данной статье представлены характеристики и результаты исследования параметров лазерного модуля с энергией импульса лазерного излучения ~ 500 J.

Лазерный модуль выполнен в виде герметичной алюминиевой кюветы, на торцах которой расположены сильфонные юстировочные фланцы с зеркалами. Размеры модуля: диаметр — 294 mm (по фланцам), длина — 2224 mm. Кювета размещалась в полиэтиленовом замедлителе. Длина замедлителя — 1820 mm, внешний диаметр — 235 mm, внутренний диаметр — 175 mm. Внутри кюветы по центру установлена 37-канальная кассета из тонкостенных нержавеющей трубок толщиной стенки 0.1 mm, внешним диаметром — 22.8 mm, длиной — 1500 mm (рис. 1, *b*). Такая толщина достигалась травлением трубок со стенкой 0.2 mm (технология РФЯЦ–ВНИИТФ). В трубках установлено 370 втулок из алюминиевого сплава АД0 длиной 150 mm каждая, внешним диаметром — 22.3 mm, внутренним диаметром — 19.5 mm. На внутреннюю поверхность втулок нанесен слой окиси-закиси урана 235 (U_3O_8) (технология РФЯЦ–ВНИИТФ). Толщина слоя ~ 3 mg/cm².

На рис. 2 представлена общая схема эксперимента. Модуль располагался в центральном канале „РУН-2“ (3) и проходил между активных зон (1 и 2) реактора „БАРС-5“ (режим работы реактора с расстоянием между центрами активных зон 500 mm). Энергия импульса лазерного излучения модуля (4), проходящего через оптические линзы (8), светофильтры (7) и (9), регистрировалась калориметрами ИМО-2Н (5). Фоторезисторами (14) из PbSe через делительные пластины (10), зеркала (11) и линзы (8) регистрировалась форма импульса генерации лазерного излучения. Линейкой фоторезисторов (15) через оптический тракт и светофильтр (13) оценивалось распределение лазерного излучения в дальней зоне. Светофильтр (7) имеет пропускание $T = 3.7\%$, (9) — $T = 2.5\%$, (13) — $T = 5\%$. Формы сигналов с фоторезисторов (14) и линейки (15) регистрировались осциллографами.

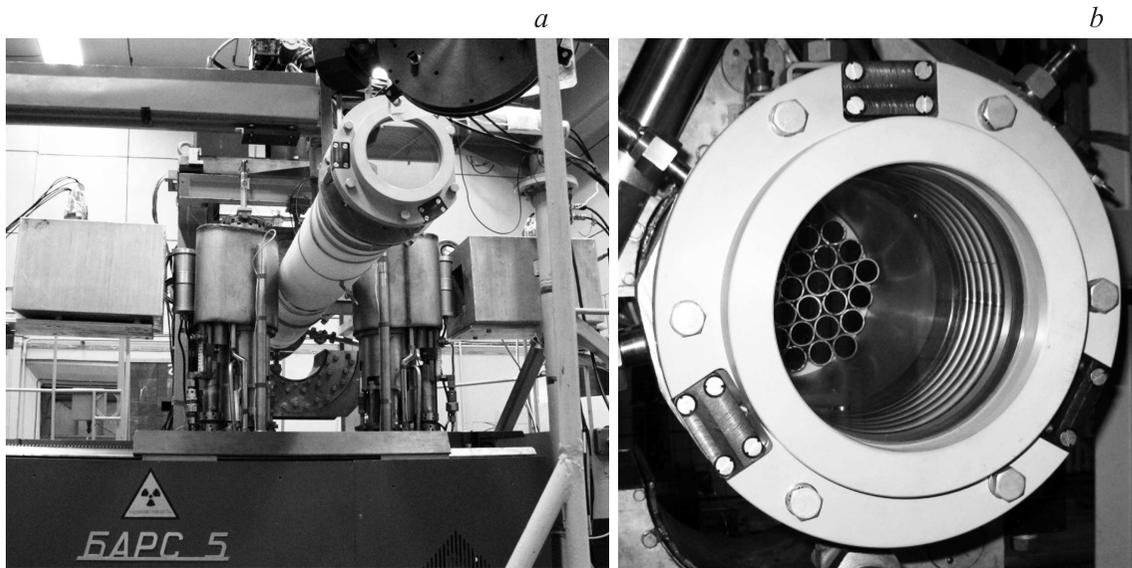


Рис. 1. Лазерный модуль в центральном канале комплекса „БАРС-5+РУН-2“ (*a*), кассета из 37 каналов в лазерном модуле (*b*).

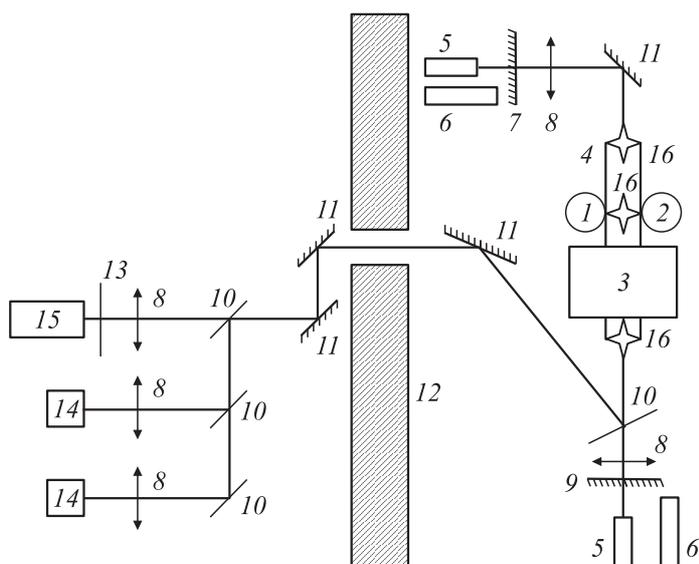


Рис. 2. Схема эксперимента: 1, 2 — активные зоны реактора „БАРС-5“, 3 — „РУН-2“, 4 — лазерный модуль, 5 — калориметры ИМО-2Н, 6 — юстировочные лазеры, 7, 9, 13 — светофильтры, 8 — линзы, 10 — делительные пластины, 11 — зеркала алюминиевые, 12 — биологическая защита, 14 — фотоприемники (фоторезисторы PbSe), 15 — линейка из фоторезисторов PbSe, 16 — камеры деления КНТ-5.

Перед импульсом лазерный модуль откачивался до остаточного давления 10^{-5} Торг. Смеситель откачивался до остаточного давления 10^{-6} Торг. Для откачки применялись турбомолекулярные вакуумные посты. Смесь инертных газов готовилась в смесителе и подавалась в модуль по трубопроводу. Давление в модуле контролировалось по манометру ОБМ-160. После заполнения модуля активной средой проводилась юстировка оптического резонатора модуля и всей оптической системы.

Измерения форм импульсов нейтронного излучения в различных областях модуля (на краях замедлителя и между активными зонах) выполнялись с помощью трех делительных камер КНТ-5 с регистрацией на осциллографы.

Распределение удельного энерговыделения в активную среду определялось экспериментально-расчетным методом. По измеренному распределению флюенса тепловых нейтронов рассчитывалось количество делений в активном слое модуля. Расчет удельного энерговыделения продуктов ядерных реакций в активную среду проводился по методу, изложенному в [5]. На рис. 3, *a* представлено распределение числа делений вдоль оси замедлителя, приходящихся на 1 г U^{235} в активном слое (энерговыделение в активных зонах „БАРС-5“ по 3.23 MJ ($1.0 \cdot 10^{17}$ div) и в „РУН-2“ — 1.87 MJ ($0.58 \cdot 10^{17}$ div)).

Величина удельной энергии, вложенной в активную среду, составила ~ 1 Дж/см³. Это не является предельным значением. Энерговыделение комплекса „БАРС-5+РУН-2“ можно повысить в 2 раза.

По результатам исследований, проведенных ранее [6], для использования в лазерном модуле была выбрана активная среда, работающая на переходе атома ксенона с длиной волны генерации лазерного излучения $2.03 \mu\text{m}$ (He–Ar–Xe (700:100:1) с суммарным давлением 4 bar), и среда, работающая на переходе атома аргона с длиной волны генерации лазерного излучения $1.79 \mu\text{m}$ (He–Ar (1140:1) с суммарным давлением 3 bar). Коэффициенты отражения зеркал резонатора для данных смесей выбраны оптимальными [6]. Результаты экспериментов представлены в таблице.

Необходимо отметить, что 21.11.2011 года в эксперименте использовалась активная среда, приготовленная и залитая в модуль за четыре дня до опыта. Это повлияло на качественный состав смеси. Возможно, произошло „отравление“ смеси или „расслоение“ газов. В результате энергия лазерного импульса снизилась.

Лучший результат по энергии в оптимальных условиях выдала среда, работающая на переходе атома ксенона с длиной волны генерации лазерного излучения $2.03 \mu\text{m}$.

Форма импульса тепловых нейтронов с камеры КНТ-5 и форма импульса генерации лазерного излучения представлены на рис. 3, *b*.

Пространственное распределение энергии лазерного пучка в дальней зоне для среды He–Ar–Xe (700:100:1) при давлении 4 bar представлено на рис. 3, *c*, где фокусное расстояние линзы $f_{2.03\mu\text{m}} = 907$ mm, шаг линейки фоторезисторов — 0.5 mm. При этом величина расходимости лазерного излучения составила 3.9 ± 0.5 mrad.

Пространственно-временное распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне представлено на рис. 3, *d*.

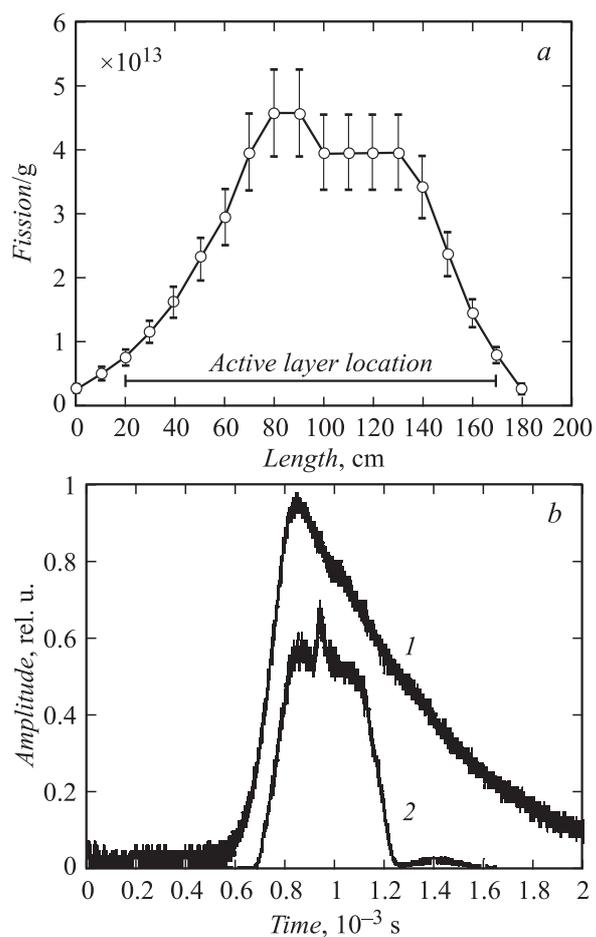


Рис. 3. Распределение числа делений на грамм U^{235} (a), форма импульса тепловых нейтронов с камеры КНТ-5 (1) и форма импульса генерации лазерного излучения (2) для среды He–Ar–Xe (700:100:1) при давлении 4 бар (b), распределение энергии лазерного пучка в дальней зоне (c), пространственно-временное распределение интенсивности лазерного излучения на линейке в дальней зоне (d).

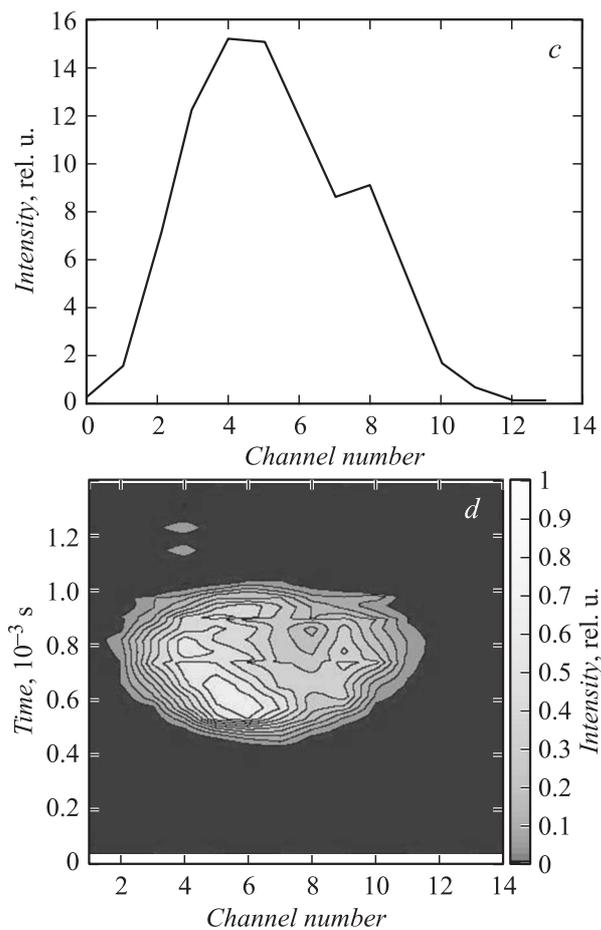


Рис. 3 (продолжение).

В результате проделанной работы:

— разработан и изготовлен лазерный модуль на энергию импульса лазерного излучения 500 J;

— в экспериментах получена энергия импульса лазерного излучения 526 J на длине волны $2.03 \mu\text{m}$ при длительности импульса $\sim 400 \mu\text{s}$, при этом пиковая мощность лазерного излучения составила $\sim 1.3 \text{ MW}$.

Результаты экспериментов

Дата	λ , μm	Смесь	Давле- ние, bar	Коэфф. отраж. зеркал резон.	Энергия, 10^{17} fis. в А31 А32 РУН-2	Удель- ный энерго- вклад, J/cm^3	Энергия/ время, $\text{J}/\mu\text{s}$	Расходи- мость θ , mrad
08.11.11	2.03	He–Ar–Xe 700 : 100 : 1	4	99% 85%	0.98 0.94 0.56	1.00	$520 \pm 104/$ 400	3.9 ± 0.5
21.11.11	2.03	He–Ar–Xe 700 : 100 : 1	4	99% 85%	1.00 1.00 0.58	1.00	$241 \pm 48/$ 380	–
25.11.11	2.03	He–Ar–Xe 700 : 100 : 1	4	99% 85%	0.99 0.99 0.60	1.00	$526 \pm 104/$ 400	3.9 ± 0.5
28.11.11	1.79	He–Ar 1140 : 1	3	99% 80%	1.03 1.03 0.60	0.71	$39 \pm 5/$ 466	–

Энерговыведение комплекса „БАРС-5+РУН-2“, при котором получен указанный результат, составляло 50% от максимального, поэтому можно ожидать, что модуль способен генерировать импульс лазерного излучения с энергией ~ 1 кДж;

— удельная энергия лазерного излучения модуля составила $\sim 32 \text{ J}/\text{dm}^3$ при КПД $\sim 3\%$.

Необходимо отметить, что полученные в экспериментах энергия и мощность импульса лазерного излучения являются рекордными на сегодняшний день для лазеров с накачкой активной среды продуктами ядерных реакций.

Список литературы

- [1] Мельников С.П., Сизов А.Н., Синянский А.А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров, 2008. С. 187–206.
- [2] Бочков А.В., Магда Э.П., Мироненко В.В., Софиев Г.С., Загидулин А.В., Подымако А.С. и др. // Материалы IV Междунар. конф. „Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы“. Обнинск, 2007. С. 134–139.

- [3] Бочков А.В., Загидулин А.В., Арадушкин А.А., Мироненко В.В., Подымако А.С., Софиенко Г.С. // Сб. докл. VIII научной конференции „Молодежь в науке“. Саров, 2009. С. 154.
- [4] Подъезжих А.Л., Снопков А.А., Черашев В.И. Реактор-умножитель нейтронов РУН-2: конструкция и физические параметры // ЛЯН-ИЯР-2007. Обнинск, 2007 г. С. 542–545.
- [5] Казазян В.Т., Литвиненко Б.А., Рогинец Л.П., Савушкин И.А. Физические основы использования кинетической энергии осколков деления. Минск, 1972. 248 с.
- [6] Бочков А.В., Магда Э.П., Мироненко В.В., Софиенко Г.С., Мурзин В.М. // Материалы III Междунар. конф. „Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы“. Снежинск, 2002. С. 134–139.