

УДК 621.031.585

УЛУЧШЕНИЕ РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛЯН В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ С ПОМОЩЬЮ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОГО УГЛОВОГО ФИЛЬТРА

А.А. Пикулев, В.М. Цветков, П.В. Соснин

Институт ядерной и радиационной физики ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

E-mail: pikulev@expd.vniief.ru

Представлены результаты экспериментального и аналитического исследования улучшения параметров излучения лазеров с ядерной накачкой с помощью внутрирезонаторного углового фильтра. Для диаметра диафрагмы 2 мм достигнуто снижение расходимости излучения в 3 раза по горизонтали и в 2 раза по вертикали. Максимальное значение энергетической яркости излучения 9 кДж/ср получено для диаметра диафрагмы 5 мм, что на 20 % выше, чем яркость излучения при отсутствии диафрагмы.

Ключевые слова:

Лазеры с ядерной накачкой, угловой фильтр, параметры лазерного пучка в дальней зоне, яркость излучения.

Key words:

Nuclear-pumped lasers, angular filter, laser beam parameters in far-field, luminosity.

В последнее время при исследовании лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) [1] значительное внимание уделяется решению вопросов, связанных с формированием излучения многоканальных лазерных установок. В связи с этим возникает задача улучшения параметров лазерного пучка в дальней зоне.

Одним из распространенных методов решения данной задачи является использование углового фильтра, который выделяет моды низкого порядка, имеющие минимальную расходимость [2]. Дополнительным преимуществом этого метода является независимость расходимости лазерного излучения в дальней зоне от влияния оптических неоднородностей, возникающих в каналах ЛЯН в процессе накачки [3].

В данной статье приведены результаты экспериментального и расчетно-аналитического исследования метода улучшения параметров лазерного пучка в дальней зоне с помощью внутрирезонаторного углового фильтра.

Экспериментальные исследования проводились на двухканальной лазерной установке с ядерной накачкой ЛУНА-2М [4], которая состоит из двух параллельно расположенных, идентичных по конструкции и условиям облучения лазерных кювет. Внутри каждой кюветы помещены параллель-

но друг другу на расстоянии 2 см две плоские алюминиевые пластины шириной 6 см и длиной 200 см. На обращенные внутрь поверхности пластин нанесены различными методами тонкие слои из окиси-закиси ^{235}U толщиной ~ 3 мг/см². Возбуждение газовой среды осуществлялось осколками деления ^{235}U , вылетающими из тонкого слоя окиси-закиси урана при взаимодействии ядер ^{235}U с нейтронами. В качестве источника нейтронов использовался реактор ВИР-2М [5]. Длительность импульса накачки на половине высоты составляла 3,2 мс, энерговыделение в активной зоне реактора – (54 ± 2) МДж.

При проведении экспериментов использовалась смесь He/Ar/Xe (380:380:1), давление 1 атм, длина волны генерации – 2,03 мкм. Средняя по объему лазерных каналов мощность накачки в максимуме реакторного импульса составляла ~ 40 Вт/см³.

Коэффициенты пропускания глухого (сферическое, с радиусом 10 м) и полупрозрачного (плоское) зеркал резонатора на длине волны 2,03 мкм соответственно были равны 0,2 и 11,9 %. Внутри резонатора размещался угловой фильтр, представляющий собой комбинацию линзовой системы и ирисовой диафрагмы.

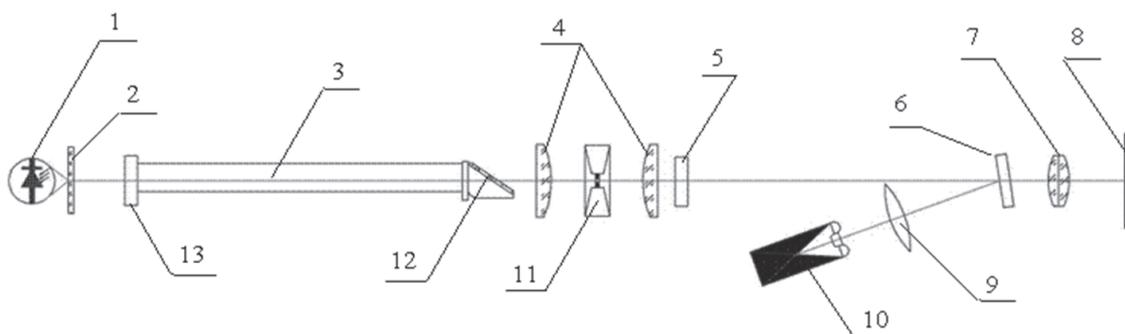


Рис. 1. Схема проведения экспериментов: 1) фотодиод; 2) матовое стекло; 3) лазерный канал; 4) линзовая система; 5) выходное зеркало резонатора; 6) делительная пластина; 7) конденсор; 8) термочувствительная мишень; 9) линза; 10) измеритель энергии; 11) ирисовая диафрагма; 12) окно Брюстера; 13) глухое зеркало резонатора

Перед проведением экспериментов были выполнены расчеты оптической схемы, основным назначением которых было определение оптимального положения внутрирезонаторных линз и диафрагмы, обеспечивающего устойчивость оптического резонатора в течение реакторного импульса.

Схема проведения экспериментов представлена на рис. 1.

Для определения энергетических параметров излучения часть излучения (около 8,5 %), отводилась от основного пучка посредством делительной пластинки и регистрировалось с помощью измерителя энергии ИМО-2Н. Регистрация формы импульса производилась с помощью фотодиода PD24-05. Перед фотодиодом для увеличения однородности засветки было установлено матовое стекло. Автограф лазерного пучка (дальняя зона) регистрировался на термочувствительной мишени.

Импульсы генерации для нескольких d приведены на рис. 2.

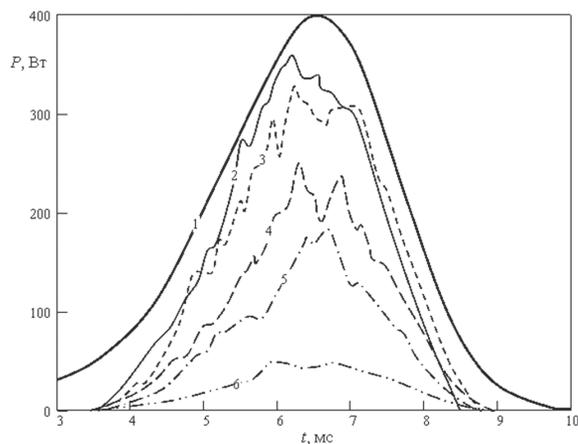


Рис. 2. Импульсы генерации для различных диаметров диафрагмы: 1) импульс реактора, отн. ед.; 2) лазерный импульс для $d=10$ мм; 3) 7 мм; 4) 5 мм; 5) 3,5 мм; 6) 2 мм

При расчетном определении мощности и энергии генерации лазера с внутрирезонаторным угловым фильтром возникают три основные задачи: 1) определение оптических неоднородностей в лазерном канале; 2) определение модовой структуры электромагнитного поля в оптическом резонаторе в отсутствие эффектов усиления и поглощения излучения; 3) расчет мощности и энергии генерации.

Для определения оптических неоднородностей была использована газодинамическая модель [6], модифицированная на случай неоднородного распределения мощности накачки по длине лазерной кюветы.

При проведении расчетов распространения излучения в оптическом резонаторе применялась квадратичная аппроксимация показателя преломления в направлении, поперечном к оптической оси. Поскольку такая оптическая система является линейной, для описания распространения излучения в оптическом резонаторе был использован хорошо разработанный аппарат матричной оптики [2].

Ниже приведены основные результаты расчетов.

Зависимость площади поперечного сечения лазерного пучка внутри оптического резонатора от времени представлена на рис. 3 (диаметр диафрагмы $d=2$ мм). Из рисунка видно, что вплоть до момента времени 7,2 мс наблюдается уменьшение площади сечения, а затем — увеличение. Максимальное сечение лазерного пучка в активном объеме составляет $2,25 \text{ см}^2$, а минимальное — $0,7 \text{ см}^2$.

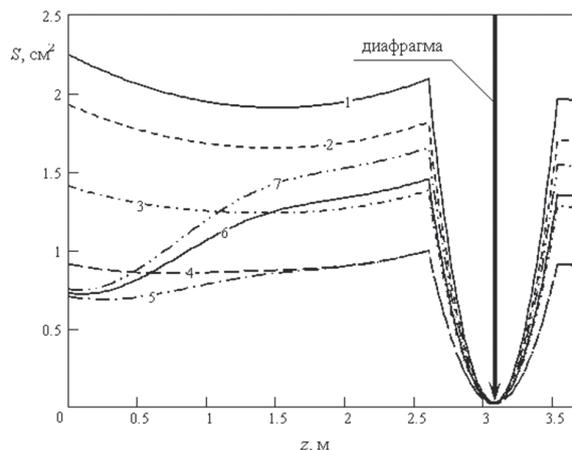


Рис. 3. Распределение площади сечения лазерного пучка внутри резонатора в различные моменты времени ($d=2$ мм): 1) до импульса; 2) 3,6 мс; 3) 4,8 мс; 4) 6 мс; 5) 7,2 мс; 6) 8,4 мс; 7) конец импульса

3) Расчеты мощности и энергии генерации проводились по формуле Ригрода [7]. При проведении расчетов были использованы следующие параметры лазерно-активной среды [8]: коэффициент усиления слабого сигнала пропорционален мощности накачки и в максимуме реакторного импульса составляет $1,2 \text{ м}^{-1}$; коэффициент распределенных потерь — $0,01 \text{ м}^{-1}$; интенсивность насыщения — 50 Вт/см^2 . Длина активной среды — 2 м. Результаты расчетов приведены на рис. 4, 5.

Результаты расчета показывают, что при отсутствии оптических неоднородностей зависимости энергии и мощности генерации от диаметра диафрагмы можно разделить на три участка: 1) квадратичный рост энергии и мощности генерации ($0 < d < 2$ мм); 2) линейный рост энергии и мощности генерации ($3 < d < 5,5$ мм); 3) мощность и энергия генерации не зависят от диаметра диафрагмы ($d > 7$ мм).

На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные значения энергии генерации в зависимости от диаметра диафрагмы. Из рисунка видно, что расчет, проведенный с учетом оптических неоднородностей, хорошо описывает результаты эксперимента (относительное различие не превышает 10...15 %).

Из рис. 4 видно, что и в расчете, и в эксперименте, критическое значение диаметра диафрагмы составляет 7...8 мм; при больших значениях диаметра энергия генерации является постоянной, для меньших значений энергия генерации падает. При этом сначала наблюдается линейное падение, связанное

с обрезанием размера пучка по горизонтали (ось Ox), а потом – квадратичное, обусловленное обрезанием поперечного размера лазерного пучка в резонаторе по двум направлениям (по осям Ox и Oy).

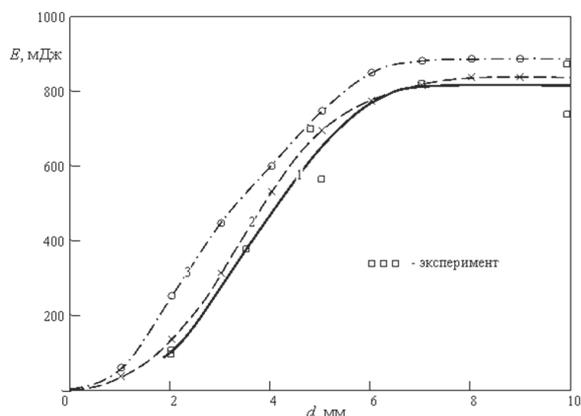


Рис. 4. Энергия генерации в зависимости от диаметра диафрагмы: 1) эксперимент; 2) расчет с учетом оптических неоднородностей; 3) расчет без учета оптических неоднородностей

Зависимость максимальной мощности генерации от диаметра диафрагмы для расчета и эксперимента представлена на рис. 5.

Автографы лазерного пучка в дальней зоне в порядке уменьшения диаметра диафрагмы приведены на рис. 6.

Размеры автографа и расходимость излучения в дальней зоне по осям Ox и Oy в зависимости от диаметра диафрагмы представлены на рис. 7. На рисунке также приведена теоретическая зависимость, полученная без учета влияния оптических неоднородностей. Учет оптических неоднородностей приводит к увеличению расходимости излучения по вертикали (ось Oy), и к незначительному уменьшению расходимости излучения по горизонтали (ось

Ox). Как видно из рисунка, для диафрагмы с диаметром 2 мм расходимость излучения уменьшается с 13...18 мрад по горизонтали и 8...11 мрад по вертикали до 5...6 мрад по обоим направлениям.

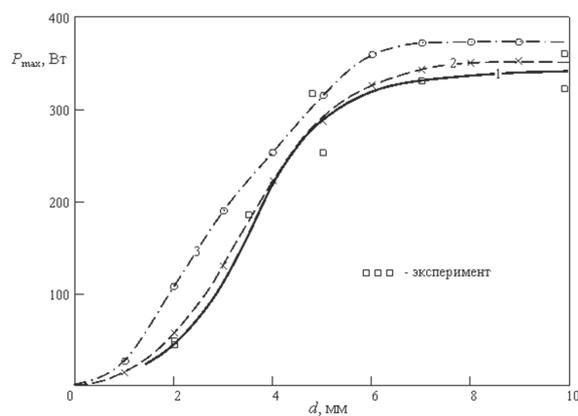


Рис. 5. Максимальная мощность генерации в зависимости от диаметра диафрагмы: 1) эксперимент; 2) расчет с учетом оптических неоднородностей; 3) расчет без учета оптических неоднородностей

В экспериментах удалось уменьшить расходимость в 3 раза по горизонтали и в ~2 раза по вертикали. Это уменьшение расходимости сопровождается уменьшением поперечных размеров лазерного пучка в 3 раза по оси Ox и ~2 раза по оси Oy .

На рис. 8 приведены энергетическая интенсивность излучения на светочувствительной бумаге и соответствующая ей энергетическая яркость в зависимости от диаметра диафрагмы. Из рисунка видно, что уменьшение диаметра диафрагмы с 10 до 5 мм приводит к незначительному (18...–20) % увеличению энергетической яркости излучения, максимальное значение которой составляет около 4,5 кДж/ср для полного автографа и 9 кДж/ср для зерна автографа. Дальнейшее уменьшение диаметра

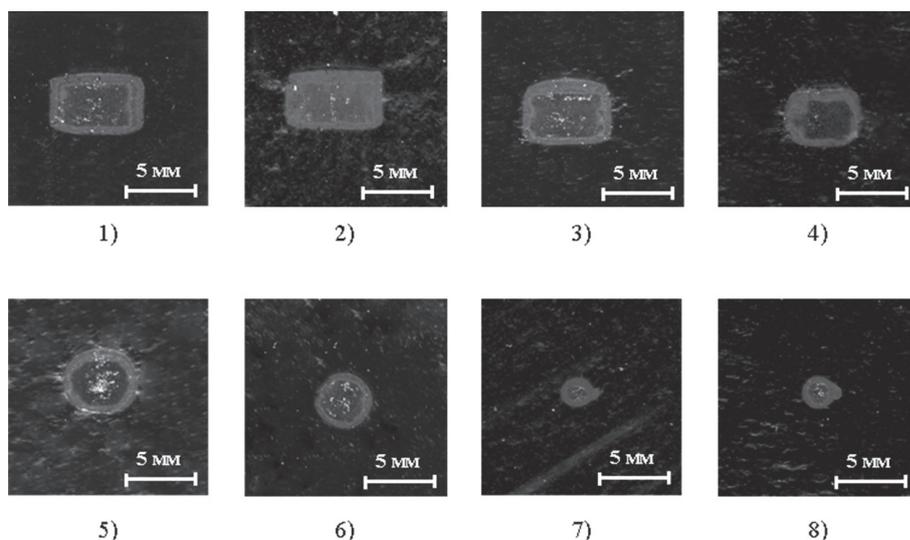


Рис. 6. Автографы лазерного пучка в дальней зоне (размер квадрата $15 \times 15 \text{ мм}^2$) в зависимости от диаметра диафрагмы d , мм: 1,2) 10; 3) 7; 4) 5; 5) 4,8; 6) 3,5; 7,8) 2

тра диафрагмы приводит к падению яркости излучения, которая для $d=2$ мм составляет 2,2 кДж/ср для полного автографа и 3,9 кДж/ср для ядра автографа. Для $d=10$ мм эти значения составляют 3,8 и 7,5 кДж/ср соответственно.

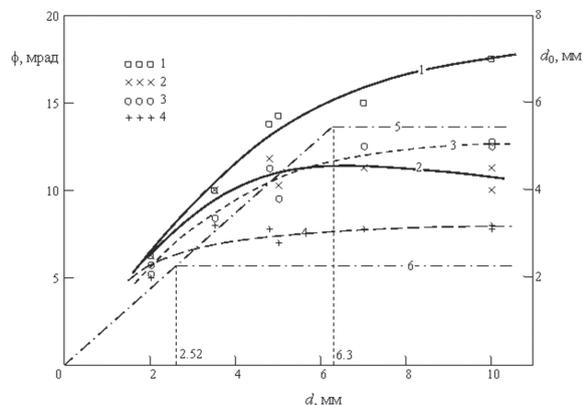


Рис. 7. Расходимость излучения в дальней зоне и размеры автографа d_0 в зависимости от диаметра диафрагмы: 1), 2) полный автограф; 3), 4) ядро автографа; 5), 6) расчет без учета влияния оптических неоднородностей (5), (6). Оси координат 1), 3), 5) Ox ; 2), 4), 6) Oy

Выводы

Проведено экспериментально-аналитическое исследование метода улучшения параметров излучения лазеров с ядерной накачкой с помощью внутрирезонаторного углового фильтра.

В экспериментах достигнуто снижение расходимости излучения в дальней зоне с 13...18 мрад по горизонтали и 8...11 мрад по вертикали (без ди-

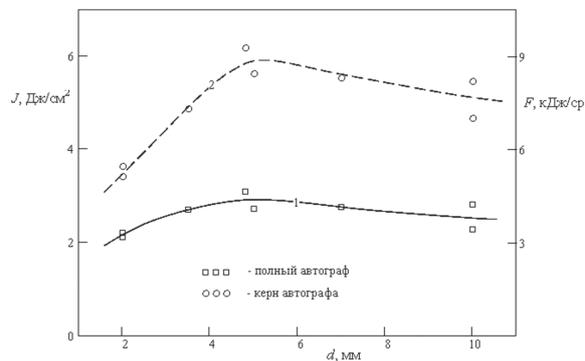


Рис. 8. Энергетическая интенсивность излучения на светочувствительной бумаге J и энергетическая яркость излучения в дальней зоне F : 1) полный автограф; 2) ядро автографа

афрагмы) до 5...6 мрад по обоим направлениям (для диафрагмы диаметром $d=2$ мм), т. е. в 3 раза по горизонтали и в 2 раза по вертикали. Максимальные мощность и энергия генерации при этом уменьшились с 360 Вт и 0,87 Дж до 48 Вт и 120 мДж соответственно, т. е. в 7,5 раза для мощности и в 7,3 раза по энергии.

Максимальное значение энергетической яркости излучения получено для диаметра диафрагмы 5 мм и составляет 4,5 и 9 кДж/ср (для полного автографа и ядра автографа), что на 18...20 % выше, чем яркость излучения для диаметра диафрагмы $d=10$ мм – 3,8 и 7,5 кДж/ср. В случае $d=2$ мм энергетическая яркость составляет 2,2 и 3,9 кДж/ср для полного автографа и ядра соответственно.

Материалы статьи доложены и обсуждены на Международной конференции Atomic and Molecular Pulsed Lasers, Томск, 14–18 сентября, 2009 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sinyanskii A.A., Melnikov S.P. Research on development of continuous nuclear-laser setups in VNIIEF // Proc. of SPIE. – 1999. – V. 3686. – P. 43–55.
2. Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.
3. Боровков В.В., Лажинцев Б.В., Нор-Армян В.А., Сизов А.Н., Синянский А.А., Фёдоров Г.И. Особенности газодинамики прокачных лазеров, возбуждаемых осколками деления урана // Квантовая электроника. – 1995. – Т. 22. – № 12. – С. 1187–1191.
4. Воинов А.М., Довбыш Л.Е., Кривонос В.Н., Мельников С.П., Мельников С.Ф., Синянский А.А. Экспериментальный комплекс на основе реактора ВИР-2М для исследования лазеров с ядерной накачкой // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2000. – Вып. 2/3. – С. 63–68.
5. Колесов В.Ф. Аperiodические импульсные реакторы. – Саратов: ВНИИЭФ, 1999. – 1032 с.
6. Пикулев А.А. Особенности газодинамики лазерных и люминесцентных кювет с ядерной накачкой при наличии буферных объемов // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75. – № 10. – С. 78–84.
7. Rigrod W.W. Homogeneously broadened CW lasers with uniform distributed loss // Journal of Quantum Electronics. – 1978. – V. QE-14. – № 5. – P. 377–381.
8. Пикулев А.А., Цветков В.М., Соснин П.В., Синянский А.А. Работа лазера с ядерной накачкой в режиме задающий генератор – усилитель // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – № 7. – С. 655–660.

Поступила 14.12.2009 г.