

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАЦИИ ЛЯН С НЕУСТОЙЧИВЫМ КОНФОКАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

LASING PARAMETERS OF NPL WITH UNSTABLE CONFOCAL RESONATOR

А. А. Пикулев, В. М. Цветков
A. A. Pikulev, V. M. Tsvetkov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific-Research Institute of Experimental Physics

Представлены результаты экспериментального исследования параметров генерации ЛЯН при использовании неустойчивого резонатора. Эксперименты проводились на установке ЛУНА-2М, применялся неустойчивый конфокальный резонатор с вогнутыми зеркалами. Использовалась активная среда He/Ar/Xe при давлении 1 атм, генерация происходила на длинах волн 2,03 и 2,65 мкм. Максимальные энергия и мощность генерации составили 300 мДж и 180 Вт соответственно, расходимость излучения в дальней зоне оказалась в несколько раз ниже, чем в случае использования устойчивого резонатора

The results of experimental research of NPL with unstable resonator are presented. Experiments were carried out on set-up LUNA-2M, unstable confocal resonator with concave mirrors was used. He/Ar/Xe active medium at pressure 1 bar was used; lasing took place wavelengths 2.03 and 2.65 microns. Maximal lasing energy and power have made 300 mJ and 180 W accordingly, divergence of radiation in far field appeared in several times lower than for case of stable resonator

Введение

Одной из важных задач, которую необходимо решить при создании лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) [1], является получение лазерного излучения высокого оптического качества. До настоящего времени решению этой задачи уделялось недостаточное внимание. Так, можно назвать только две экспериментальные работы [2], [3], в которых ставилась задача улучшения параметров излучения ЛЯН в дальней зоне.

В работе [2] улучшение параметров излучения достигалось с помощью синхронизации излучения нескольких лазерных ячеек, объединенных общим резонатором с рассеивателем, который обеспечивал обмен излучением между различными ячейками. В экспериментах была достигнута частичная синхронизация излучения лазерных ячеек и в несколько раз уменьшена расходимость, правда, за счет существенного снижения мощности и энергии генерации [2].

Метод уменьшения расходимости лазерного излучения в дальней зоне с помощью внутррезонаторного углового фильтра был исследован в работе [3]. В экспериментах было получено трехкратное снижение расходимости по горизонтали и двукратное – по вертикали. Однако, снижение расходимости сопровождалось пропорциональным уменьшением мощности генерации, в результате чего увеличение энергетической яркости излучения составило всего 20 % [3].

Для улучшения параметров лазерного излучения в настоящее время широкое применение получило использование неустойчивого резонатора, которое наиболее эффективно для одноканальных широкоапертурных лазеров [4]. В связи с тем, что в неустойчивых резонаторах генерация происходит на единственной моде, расходимость лазерного излучения близка к дифракционной независимо от числа Френеля резонатора.

В данном докладе представлены результаты экспериментального исследования параметров излучения лазера с накачкой активной среды осколками деления урана при использовании неустойчивого конфокального резонатора.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на двухканальной лазерной установке с ядерной накачкой ЛУНА-2М [5]. Лазерный блок установки ЛУНА-2М (рис. 1) состоит из двух идентичных по конструкции и условиям облучения кювет. Газовый объем кювет ограничивается с одной стороны сильфонными узлами (поз.4), в которых закреплены зеркала (поз. 3); с противоположной стороны

кюветы ограничены окнами Брюстера (поз. 5). Расстояние от зеркал до окон Брюстера составляет ~2,4 м. Внутри каждой кюветы параллельно друг другу на расстоянии 2 см помещены две плоские алюминиевые пластины шириной 6 см и длиной 200 см (поз. 2). На внутренние поверхности пластин нанесены слои окиси-закиси урана с поверхностной плотностью $3,2 \text{ мг/см}^2$ ($2,6 \text{ мг/см}^2$ по металлическому ^{235}U). Активный объем кюветы составляет 1,94 л.

Возбуждение газовой смеси осуществлялось осколками деления ^{235}U , вылетающими из слоев при взаимодействии ядер ^{235}U с нейтронами. Источником нейтронов служил водный импульсный реактор ВИР-2М [6]. Энерговыведение реактора составляло 56 МДж, при этом длительность нейтронного импульса на полувысоте была равна 2,9 мс.

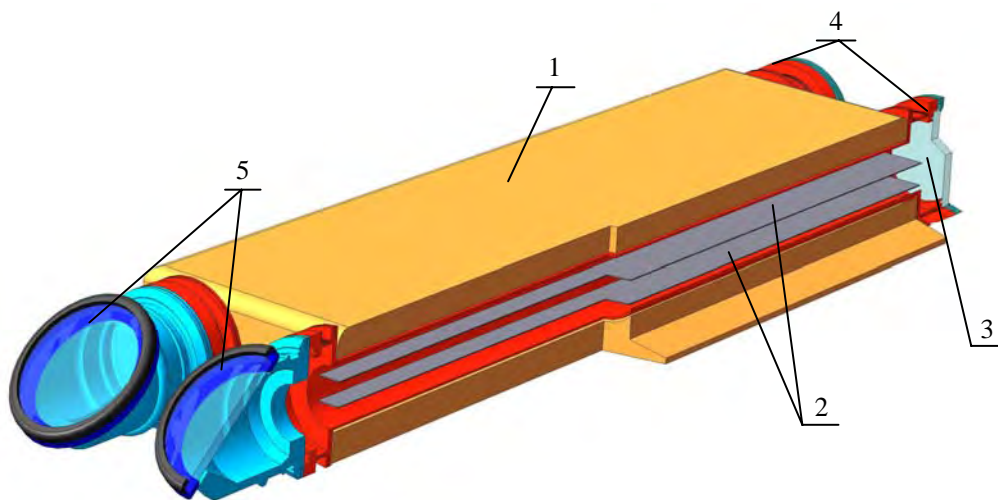


Рис. 1. Конструкция лазерного блока установки ЛУНА-2М: 1 – замедлитель; 2 – пластины с урановыми слоями; 3 – резонаторные зеркала; 4 – юстировочные сильфонные узлы; 5 – окна Брюстера

В экспериментах использовалась смесь He-Ar-Xe (380:380:1) с общим давлением 101,3 кПа (1 атм). В максимуме реакторного импульса среднее по площади урановых слоев значение плотности потока нейтронов составляло величину $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, при этом энерговклад в газую среду достигал 40 Вт/см^3 .

Схема проведения экспериментов

Оптический резонатор лазерного канала №1 установки ЛУНА-2М являлся неустойчивым, а канала № 2 – устойчивым. Оба лазерных канала заполнялись одной и той же лазерной смесью, при этом второй канал использовался как референтный.

Резонатор лазерного канала №1 был выполнен по схеме конфокального неустойчивого резонатора с использованием вогнутых зеркал. Были экспериментально исследованы два способа вывода излучения из резонатора: 1) боковой и 2) симметричный.

Схема неустойчивого резонатора с симметричным выводом излучения представлена на рис. 2. Зеркала резонатора были оптимизированы под длину волны генерации 2,65 мкм, расстояние между ними составляло 3,5 м. Радиус выходного зеркала составлял 2 м, а «глухого» – 5 м. Коэффициент пропускания «глухого» зеркала на длине волны 1,73 мкм был равен 85,3 %, 2,03 мкм – 64,6 %, 2,65 мкм – 0,19 %.

На рис. 3 схематично представлено расположение зеркал неустойчивого резонатора при боковом (рис. 3а) и симметричном (рис. 3б) выводе излучения (вид со стороны выходного зеркала). При боковом выводе выходное зеркало (поз. 3) горизонтально смещено относительно оси канала (поз.1) таким образом, что ось канала находится на расстоянии 9 мм от края зеркала. Поперечное сечение лазерного пучка, выводимого из резонатора (поз. 6), имеет размеры $14 \times 20 \text{ мм}^2$. В случае симметричного вывода поперечное сечение лазерного пучка представляет собой рамку с размерами $20 \times 45 \text{ мм}^2$ и прямоугольным отверстием со скругленными краями $8 \times 18 \text{ мм}^2$ (поз. 6).

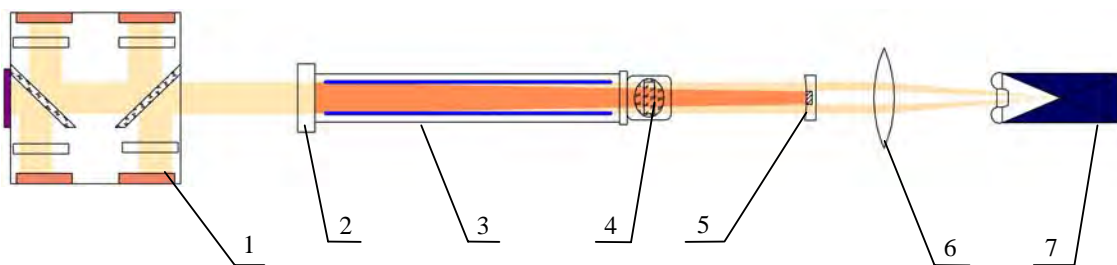


Рис. 2. Схема проведения экспериментов на лазерном канале № 1: 1 – блок фотоприемников ФСА; 2 – диэлектрическое зеркало резонатора; 3 – лазерный канал; 4 – окно Брюстера; 5 – алюминиевое зеркало резонатора; 6 – линза; 7 – измеритель энергии ИМО-2Н

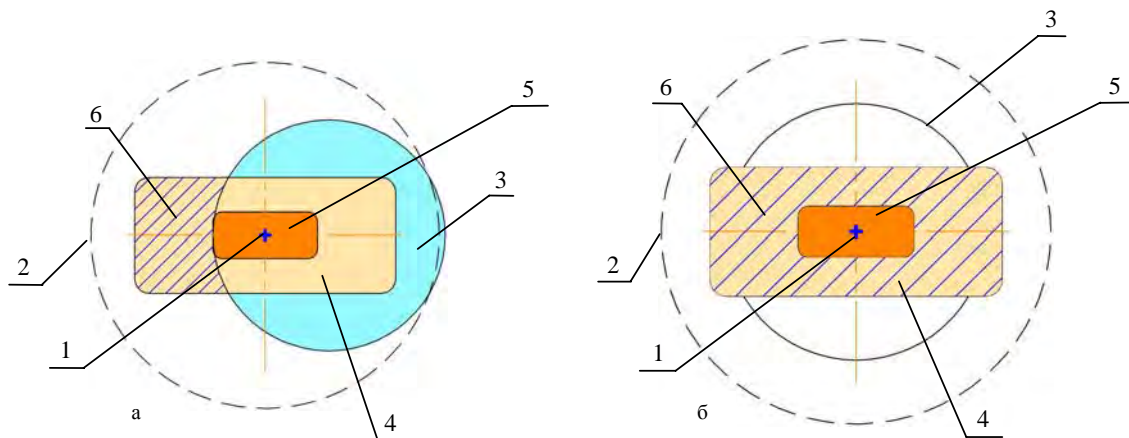


Рис. 3. Схемы вывода излучения: а – боковой; б – симметричный: 1 – ось лазерного канала; 2 – контур заднего диэлектрического зеркала; 3 – кварцевая подложка; 4 – апертура канала, заполненная излучением ($20 \times 45 \text{ мм}^2$); 5 – область излучения, попадающего на заднее зеркало ($18 \times 8 \text{ мм}^2$); 6 – излучение, выводимое из канала

Результаты экспериментов

Параметры генерации неустойчивого резонатора изучались в 6 импульсах. В четырех экспериментах (№№ 1–4) был реализован боковой вывод излучения, а в двух экспериментах (№ 5, № 6) – симметричный. Энергия генерации неустойчивого резонатора для бокового вывода излучения составила 150 мДж, для симметричного – около 300 мДж; максимальная энергия генерации лазера с устойчивым резонатором составила 180 мДж.

Эксперименты № 1, № 2 показали, что генерация происходит на трех длинах волн: 1,73, 2,03 и 2,65 мкм. Для определения доли, вносимой каждой линией в энергию генерации, были проведены эксперименты № 3, № 4, в которых перед входным окном измерителя энергии устанавливались узкополосные интерференционные фильтры, обрезающие длины волн 1,73, 2,03 мкм (эксперимент № 3) и 1,73; 2,65 мкм (эксперимент № 4).

Результаты экспериментов показали, что вклад излучения с длиной волны 2,03 мкм составляет около 90 %, а остальные 10 % приходятся на 2,65 мкм. Генерация на длине волны 1,73 мкм происходит на сходящейся волне, концентрирующейся около оптической оси резонатора, поэтому ее вклад в энергию генерации пренебрежимо мал.

Невысокая мощность излучения на длине волны 2,65 мкм, которая наблюдалась в экспериментах, связана с поглощением в парах воды. Учитывая, что коэффициент поглощения излучения на длине волны 2,65 мкм составляет величину $\sim 0,2 \text{ м}^{-1}$ (влажность воздуха 50 %, температура 293 К) [7], а длина внутризонального воздушного участка равна 114 см, потери излучения с длиной волны 2,65 мкм в парах воды можно оценить величиной 40 %. В результате, генерация на длине волны 2,03 мкм имела более низкий порог и большую энергию, чем генерация на длине волны 2,65 мкм.

С целью получения информации о пространственных характеристиках лазерного пучка в дальней зоне в эксперименте № 5 вместо измерителя мощности (поз.7, рис. 2) была установлена термочувствительная мишень.

На рис. 4 представлены автографы лазерных пучков, полученных для случая использования устойчивого (рис. 4а) и неустойчивого, с симметричным выводом излучения (рис. 4б), резонаторов на термочувствительной мишени в фокусе линзы.

Автограф лазерного пучка устойчивого резонатора представляет собой прямоугольник с размерами $4,3 \times 3,3 \text{ мм}^2$. Расходимость лазерного излучения в дальней зоне составляет 14 мрад по горизонтали и 11 мрад по вертикали (по $\sim 10\%$ уровню плотности энергии излучения).

Габаритный размер каждого из пятен, составляющих автограф лазерного пучка неустойчивого резонатора, равняется $2,3 \times 3,9 \text{ мм}^2$ (рис. 4б).

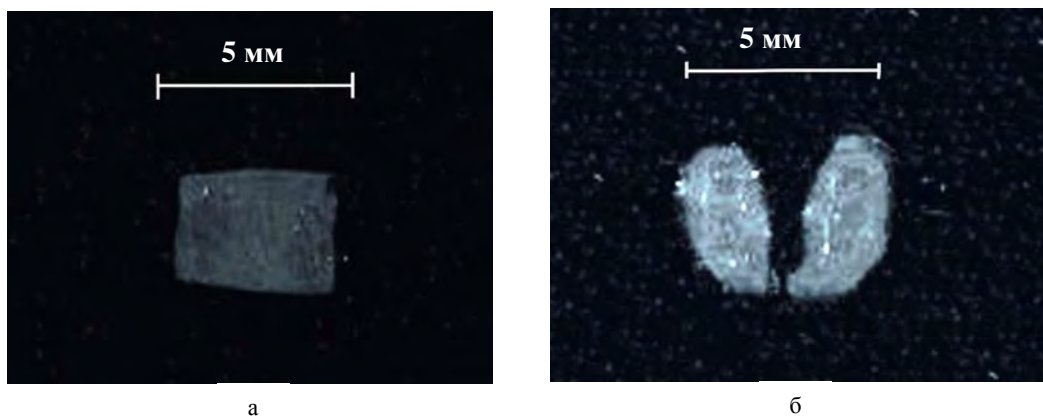


Рис. 4. Автограф лазерного пучка в фокусе линзы: а – устойчивый резонатор; б – неустойчивый резонатор

Из рис. 4б видно, что фокальная плоскость линзы не совпадает с перетяжкой лазерного пучка. Это связано с тем, что в течение реакторного импульса внутри оптического резонатора лазера по горизонтальной оси возникает рассеивающая линза, а по вертикальной – фокусирующая. В результате, лазерный пучок на выходе из резонатора является астигматическим, расходящимся по горизонтальной и сходящимся по вертикальной осям.

Оценки показывают, что средний горизонтальный фокус лазерного пучка сдвинут на расстояние 35 мм правее, а вертикальный – на 50 мм левее фокуса линзы. При этом радиусы кривизны волнового фронта лазерного пучка в максимуме импульса генерации составляют $\sim 3 \text{ м}$ по горизонтали и $\sim 1,6 \text{ м}$ по вертикали. Расходимость лазерного пучка определяется оптическими неоднородностями и по горизонтальной оси не превосходит 3 мрад, а по вертикальной – составляет около 5 мрад, что соответственно в 5 и 2 раза ниже, чем у устойчивого резонатора.

Импульс генерации, полученный в эксперименте № 6 (симметричный вывод излучения), представлен на рисунке 5. Из рисунка видно, что максимумы импульсов реактора и генерации практически совпадают. При этом порог генерации на длине волны 2,03 мкм составляет примерно $1/3$ от максимума реакторного импульса, что соответствует мощности накачки 13 Вт/см^3 , а на длине волны 2,65 мкм – $1/2$ от максимума импульса, или около 20 Вт/см^3 .

Результаты расчетов

Нами были проведены расчеты параметров генерации в случае использования неустойчивого резонатора. Мощность генерации определялась по формуле Ригрода [8]

$$P_{\text{out}} = kVI^s \left\{ \frac{\alpha_0}{k + \rho_{\text{eff}}} - 1 \right\}, \quad k = \frac{\ln\{M\}}{L}, \quad \rho_{\text{eff}} = \rho + \frac{1}{2L} \ln \left\{ \frac{1}{r_1 r_2 T^2} \right\},$$

где α_0 – коэффициент усиления слабого сигнала; I^s – интенсивность насыщения; ρ – коэффициент распределенных потерь; k – коэффициент активных сосредоточенных потерь; L – длина активной среды; M – коэффициент увеличения резонатора; $r_{1,2}$ – коэффициенты отражения зеркал резонато-

ра; T – коэффициент пропускания внутрирезонаторных оптических элементов; $V = SL$ – объем лазерно-активной среды; S – площадь поперечного сечения лазерного пучка.

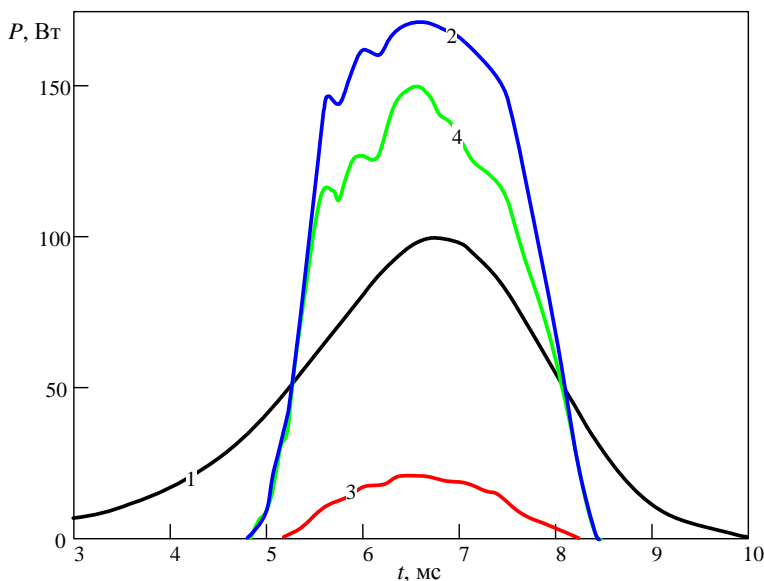


Рис.5. Импульсы реактора и генерации: импульс реактора (1); импульс генерации(2); генерация на длине волны 2,65 мкм (3); 2,03 мкм (4)

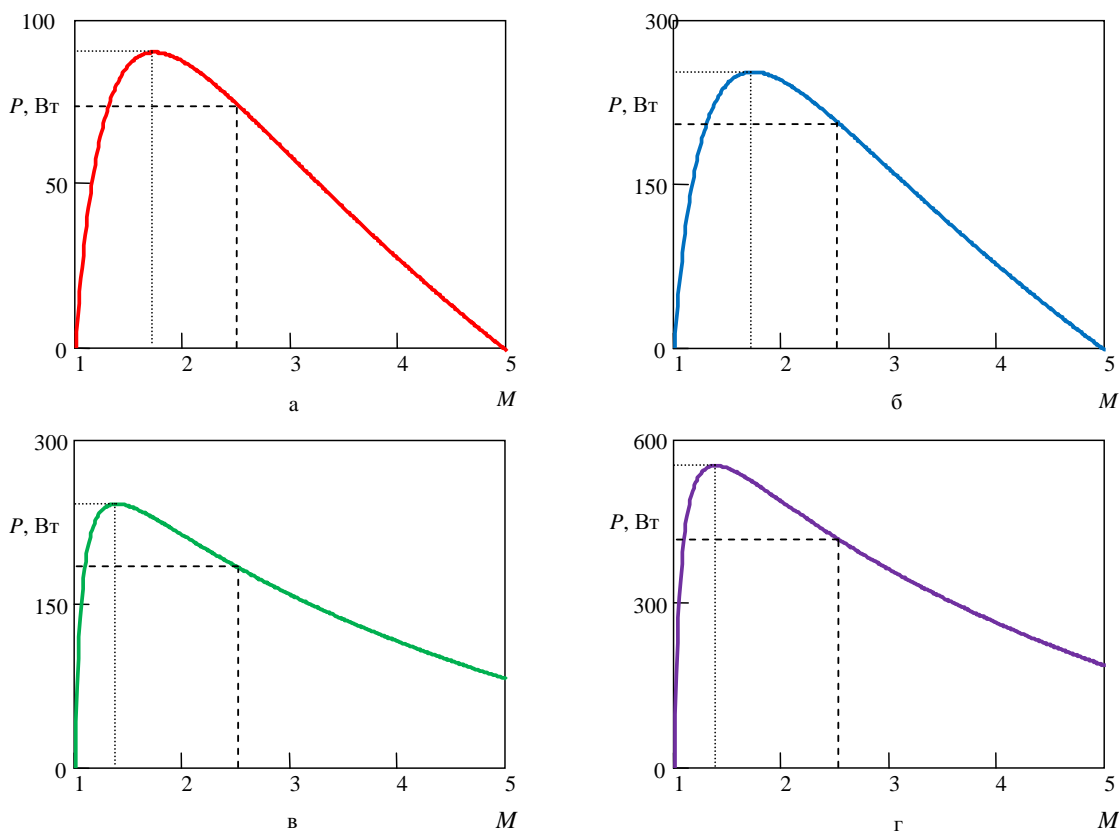


Рис. 6. Зависимость мощности генерации на длине волны 2,03 мкм от коэффициента увеличения резонатора: а – боковой вывод излучения, $r_1 = 0,35$; б – симметричный вывод излучения, $r_1 = 0,35$; в – боковой вывод излучения, $r_1 = 1$; г – симметричный вывод излучения, $r_1 = 1$

На рис. 6 приведены результаты расчетов максимальной мощности генерации на длине волны 2,03 мкм в зависимости от коэффициента увеличения резонатора. При проведении расчетов использовались следующие параметры [7]: $\alpha_0 = 1,2 \text{ м}^{-1}$; $F = 60 \text{ Вт/см}^2$; $S = 9 \text{ см}^2$; $\rho = 0,01 \text{ м}^{-1}$; $L = 2 \text{ м}$; $r_1 = 0,35$ (как в данных экспериментах) и $r_1 = 1$ (глухое); выходное алюминиевое зеркало $r_2 = 0,96$.

Из рис. 6 а,б видно, что максимальная мощность генерации достигается при использовании резонатора с коэффициентом увеличения $M = 1,7$, которая в случае бокового вывода излучения составляет около 90 Вт, а для симметричного – 250 Вт. Для коэффициента увеличения $M = 2,5$, использованного в экспериментах, мощность генерации несколько ниже – 75 Вт в случае бокового и 200 Вт в случае симметричного вывода излучения. Отметим, что последние значения близки к полученным в экспериментах – 70 и 170 Вт соответственно.

Мощность генерации может быть повышена при использовании глухого заднего зеркала резонатора на длине волны излучения 2,03 мкм (рис. 6 в,г). Расчеты показывают, что максимальная мощность генерации достигается при использовании резонатора с коэффициентом увеличения $M = 1,35$: 230 Вт – для бокового и 550 Вт – для симметричного вывода излучения. Для коэффициента увеличения $M = 2,5$ максимальная мощность генерации составляет 190 и 430 Вт соответственно.

Выводы

В докладе представлены результаты экспериментального исследования параметров генерации конфокального неустойчивого резонатора с вогнутыми зеркалами. Были исследованы боковой и симметричный способы вывода излучения.

В процессе выполнения работы были получены следующие результаты:

- мощность (энергия) генерации составила 70 Вт (150 мДж) для бокового и около 170 Вт (300 мДж) для симметричного вывода излучения;

- в спектре генерации присутствуют три длины волны, соответствующие переходам атома ксенона: 1,73, 2,03 и 2,65 мкм. Излучение на длине волны 2,03 мкм дает около 90 % от полной энергии генерации, а остальные 10 % приходится на длину волны 2,65 мкм. Генерация на длине волны 1,73 мкм происходит на сходящейся волне, концентрирующейся около оптической оси резонатора, и имеет низкую энергетiku;

- порог генерации на длине волны 2,03 мкм составляет около 1/3 от максимума реакторного импульса, что соответствует мощности накачки 13 Вт/см^3 , а на длине волны 2,65 мкм – 1/2 от максимума импульса, или около 20 Вт/см^3 ;

- в максимуме импульса генерации радиус кривизны волнового фронта лазерного пучка на выходе из оптического резонатора по горизонтали составляет около 3 м (расходящийся волновой фронт), а по вертикали – 1,6 м (сходящийся). Оценки показывают, что расходимость лазерного пучка, полученная в экспериментах, составляет около 3 мрад по горизонтали и 5 мрад по вертикали и определяется оптическими неоднородностями;

- расходимость излучения лазерного канала с неустойчивым резонатором в дальней зоне по горизонтали в ~ 5 раз, а по вертикали – в ~ 2 раза ниже, чем в случае лазерного канала с устойчивым резонатором;

- расчеты, проведенные для случая использования глухого заднего зеркала резонатора, показывают, что максимальная мощность генерации достигается при использовании неустойчивого резонатора с коэффициентом увеличения 1,35, и в случае бокового вывода излучения составляет около 230 Вт, а для симметричного – 550 Вт. Для коэффициента увеличения 2,5, использованного в экспериментах, расчетное значение мощности генерации составляет 190 Вт в случае бокового и 430 Вт в случае симметричного вывода излучения.

Список литературы

1. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.

2. Бочков А. В., Магда Э. П., Софиенко Г. С., Мироненко В. В., Мурзин В. М. / Труды III межд. конф. «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». Снежинск: 2003. С. 244–246.

3. Pikulev A. A., Tsvetkov V. M., Sosnin P. V. / The IX International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Lasers». Conference Abstracts. Tomsk, IAO SB RAS: 2009. P. 18.
4. Быков В. П., Силичев О. О. Лазерные резонаторы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
5. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривоносов В. Н., Мельников С. П., Мельников С. Ф., Синянский А. А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2000. Вып.2/3. С. 63–68.
6. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеевко А. С., Мельников С. Ф., Левицкий И. В., Маслов Г. Н., Павловская Л. М., Самодуров Л. А., Гладков В. С. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 3–15.
7. Пикулев А. А., Цветков В. М., Соснин П. В., Синянский А. А. // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 7. С. 655–660.
8. Rigrod W. W. // Journal of Quantum Electronics. 1978. Vol. QE-14. N. 5. P. 377–381.