

ЛАЗЕРЫ

Одномодовый дисковый Nd:GGG-лазер с трехпучковой диодной накачкой и резонатором вырожденного типа

А.М.Бульканов, Д.А.Николаев, В.Б.Цветков, А.И.Шаматова, И.А.Щербаков

Исследованы энергетические и пространственные выходные параметры твердотельного дискового Nd:GGG-лазера с трехпучковой накачкой и резонатором вырожденного типа, имеющим единственный канал вывода излучения. Вывод излучения из резонатора был осуществлен за счет использования как дополнительного выходного полупрозрачного зеркала, так и одного из зеркал резонатора с переменным коэффициентом отражения. Все области накачки активного элемента были связаны между собой единым внеосевым внутрирезонаторным пучком.

Ключевые слова: твердотельные лазеры, дисковые активные элементы, резонаторы вырожденного типа, многопучковая диодная накачка.

1. Введение

Использование дисковой формы активных элементов (АЭ) [1] и многопучковой оптической накачки [2] может приводить к существенному уменьшению негативного влияния термонаведенных оптических эффектов (таких как линза и двулучепреломление) на выходные параметры твердотельных лазеров. Реализация многопучковой накачки требует согласованного участия всех областей с инверсией населенности в процессе лазерной генерации. Обеспечить такую согласованность можно за счет применения вырожденных типов резонаторов [3]. При этом предполагается использование одного из важных свойств вырожденной конфигурации резонатора – наличия внеосевого внутрирезонаторного пучка, который замыкается сам на себя после серии круговых обходов резонатора (см., напр., [4–9]). Параметры резонатора должны быть выбраны такими, чтобы все проходы внутрирезонаторного излучения через дисковый активный элемент (ДАЭ) происходили только в пределах областей пятен накачки. Целью настоящей работы являлась разработка дискового лазера с трехпучковой накачкой и одним каналом вывода излучения из резонатора. Одноканальность вывода излучения осуществлялась за счет использования как дополнительного выходного полупрозрачного зеркала резонатора, так и одного из зеркал резонатора с переменным по поперечному сечению коэффициентом отражения. Лазер работал в режиме генерации TEM_{00} моды.

А.М.Бульканов. Научно-исследовательский институт им. А.Ю.Машилина, Россия, 124460 Москва, Зеленоград, Георгиевский просп. 5, стр.2

Д.А.Николаев, И.А.Щербаков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: nikolaev@lsk.gpi.ru

В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

А.И.Шаматова. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 13 февраля 2018 г.

2. Условия эксперимента

Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Схемы обоих резонаторов лазера и геометрический ход лучей в них представлены на рис.2. Плоскость рис.2 ортогональна по отношению к плоскости рис.1.

В первом случае (рис.2,а) резонатор лазера был образован высокоотражающими зеркалами 3, 31 и выходным зеркалом 32. Во втором случае (рис.2,б) дополнительное

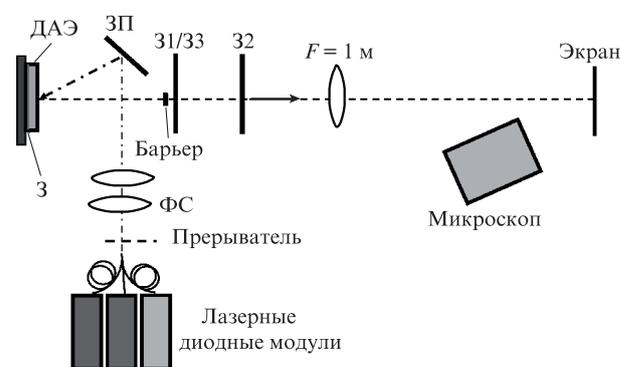


Рис.1. Оптическая схема эксперимента:

3, 31/33 и 32 – зеркала резонатора; ЗП – поворотное зеркало канала накачки; ФС – фокусирующая система накачки.

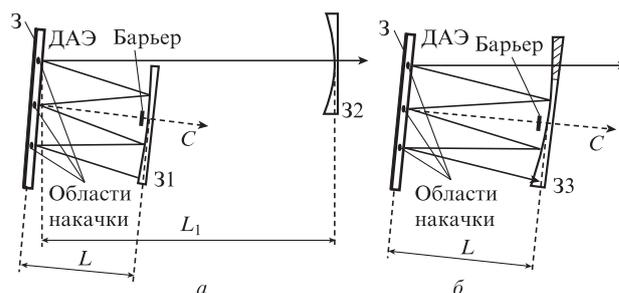


Рис.2. Оптические схемы резонаторов с дополнительным выходным зеркалом (а) и зеркалом с переменным коэффициентом отражения (б).

зеркало 32 не использовалось, а вместо зеркала 31 использовалось зеркало 33, часть которого в области вывода излучения из резонатора была выполнена полупрозрачной.

Плоское зеркало 3 с коэффициентом отражения более 99.5% на длинах волн 1062 и 808 нм было нанесено на заднюю поверхность ДАЭ. Зеркала 31 и 33 были сферическими с радиусом кривизны $R_{\text{curv}} = 200$ мм. Коэффициенты отражения зеркала 31 и высокоотражающей части зеркала 33 превышали 99.5% на длине волны 1062 нм. В ходе исследований использовались зеркала 32 с коэффициентами отражения 75%, 80%, 85%, 88%, 94% и 98%. Коэффициент отражения зеркала 33 в области вывода излучения из резонатора составлял 95%.

Пары зеркал 3–31 и 3–33 образовывали резонаторы, построенные по типу вырожденного. Длина L каждого из этих резонаторов равнялась 50 мм. Особенностью вырожденного резонатора является замкнутость траектории внеосевого луча за N круговых продольных и K круговых поперечных обходов резонатора, которые связаны с L и R следующим образом [5]:

$$\frac{L}{R} = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi K}{N} \right). \quad (1)$$

В нашем случае $K = 1$, $N = 6$. В резонаторе с такими параметрами любой луч замыкается сам на себя после шести продольных и одного поперечного кругового обходов. После трех продольных обходов любой луч трансформируется в симметричный исходному относительно оси резонатора C . Пройденное лучом расстояние L_1 (рис.2,а) между зеркалами 3 и 32 составляло 150 мм. Расстояние L_1 и радиус кривизны выходного зеркала 32 выбирались такими, чтобы они не нарушали параметры ТЕМ₀₀ пучка, определяемые характеристиками вспомогательного резонатора 3–31. Углы между осями C резонаторов и осями выходного пучка в обоих случаях составляли 42 мрад.

В качестве ДАЭ в обоих случаях использовался кристалл Nd:GGG диаметром 50 мм и толщиной 1,5 мм с концентрацией ионов Nd³⁺, составляющей $\sim 2 \times 10^{20}$ см⁻³. Накачка АЭ осуществлялась тремя лазерными диодными модулями K808DAECN (BWT Beijing LTD) с волоконными системами вывода излучения, диаметры сердцевин которых равнялись 400 мкм. Длина волны излучения накачки составляла 808 нм. Фокусирующая система, состоящая из двух объективов (с компенсацией сферической аберрации), проецировала изображение выходных торцов оптических волокон на поверхность ДАЭ. Использование данной системы накачки позволяло, в отличие от [3], получать требуемые диаметры пучков накачки в ДАЭ при произвольном расстоянии между пучками. Радиусы пучков накачки в объеме АЭ по уровню $1/e^2$ составляли 250, 220 и 280 мкм. Расстояние между соседними пучками накачки в ДАЭ было равно 6.3 мм. Поворотное зеркало 3П служило для уменьшения угла между осями пучков накачки и осями C резонаторов. Величина этого угла внутри АЭ составляла примерно 5°.

Исследования проводились с использованием непрерывного и импульсно-периодического режимов накачки. В последнем случае применялся механический прерыватель в виде диска с отверстием, вращающегося с частотой 2.5 Гц. При этом ослабление средней мощности накачки составляло 10, а длительность импульсов накачки была равна приблизительно 40 мс. Это время было сопостави-

мо с временем релаксации температуры по поперечному сечению пучка $t_T \approx \omega^2/\chi = 30$ мс, где $\omega = 0.028$ см – радиус пучка накачки по уровню $1/e^2$, а $\chi = 0.026$ см²·с⁻¹ – температуропроводность кристалла Nd:GGG. Время закрытого состояния прерывателя составляло 0.36 с. Это время было существенно больше времени t_T , однако меньше времени установления температуры по всему объему АЭ $t \approx L^2/\chi = 0.8$ с, где $L = 0.15$ см – толщина АЭ.

Для предотвращения развития генерации от центрального пятна накачки вдоль осей C резонаторов вблизи зеркал 31 и 33 устанавливался непрозрачный экран (барьер) диаметром 2 мм.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Экспериментально исследовались зависимости выходной мощности генерации и полной расходимости лазерного излучения 2θ по уровню 0.5 от коэффициента пропускания выходного зеркала и мощности излучения накачки, поглощенной в активном элементе. При этом значения поглощенной мощности для каждого из пучков накачки были примерно одинаковы. Расходимость выходного излучения изучалась путем измерения поперечного распределения интенсивности лазерного пучка в области перетяжки, расположенной в фокальной плоскости собирающей линзы с фокусным расстоянием $F = 1$ м. Измерения проводились при помощи микроскопа, снабженного системой визуализации и обработки изображения.

3.1. Резонатор с дополнительным зеркалом

Зависимости выходной мощности лазерного излучения от суммарной поглощенной мощности накачки для непрерывного и импульсно-периодического режимов работы лазера с резонатором, изображенным на рис.2,а, приведены на рис.3,а и б соответственно.

Наибольшая эффективность лазера η , равная 35% (дифференциальная эффективность 44%) была достигнута в импульсно-периодическом режиме при использовании зеркала с коэффициентом отражения 88%. В случае непрерывной накачки максимальное значение $\eta = 24.5\%$ было достигнуто при использовании выходного зеркала с коэффициентом отражения 94%. Падение выходной мощности в непрерывном режиме было связано с влиянием термонаведенных линз в ДАЭ вследствие его относительно большой толщины. В этом случае особенно сказывается влияние изменения траектории внутрирезонаторного пучка при внеосевых прохождениях толстых линз и его падении на них под углами, отличными от нормального.

Полный угол расходимости 2θ лазерного пучка по уровню 0.5 составил около 2.9 мрад. Его значение практически не зависело ни от режима работы лазера (непрерывная или импульсно-периодическая накачка), ни от мощности накачки, ни от коэффициента отражения выходного зеркала резонатора. Зависимость расходимости излучения от поглощенной мощности непрерывной накачки для $R = 88\%$ приведена на рис.4. Расчетное значение полного угла расходимости ТЕМ₀₀ пучка составляло 2.4 мрад. Таким образом, во всем диапазоне условий эксперимента выходной пучок имел параметр качества M^2 , равный примерно 1.2, и был близок к одномодовому. Этот результат хорошо согласуется с результатами работ

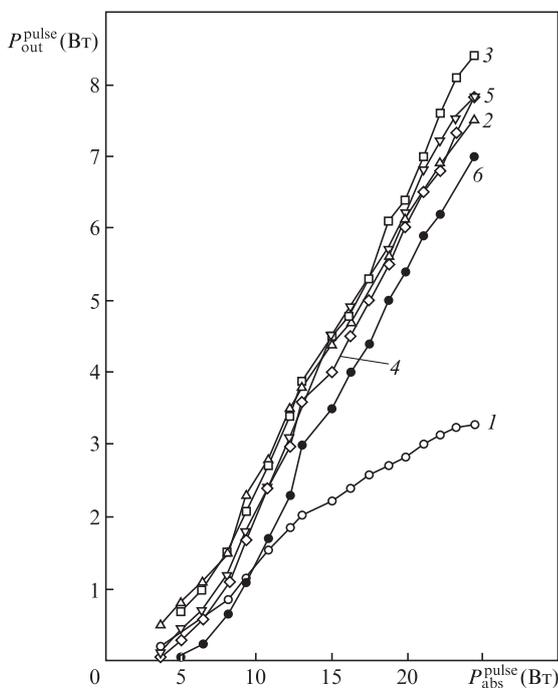
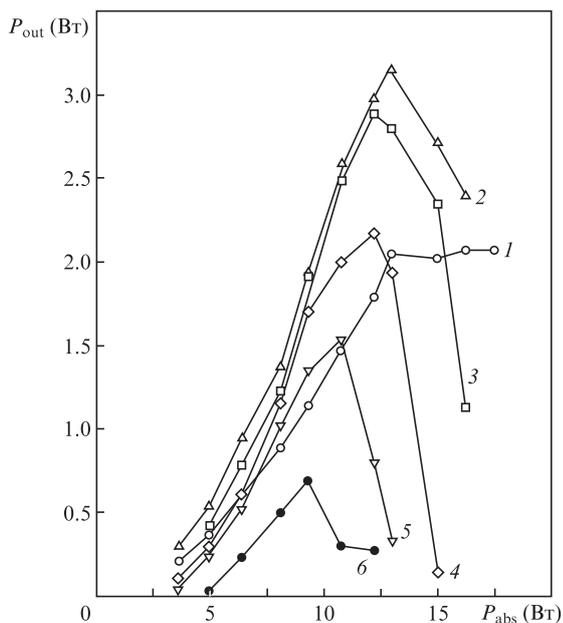


Рис.3. Зависимости непрерывной (P_{out}) и импульсной (P_{out}^{puls}) выходных мощностей излучения от суммарной поглощенной непрерывной (P_{abs}) (а) и импульсной (P_{abs}^{puls}) (б) мощностей накачки при коэффициентах отражения выходного зеркала $R = 98\%$ (1), 94% (2), 88% (3), 85% (4), 80% (5) и 75% (6).

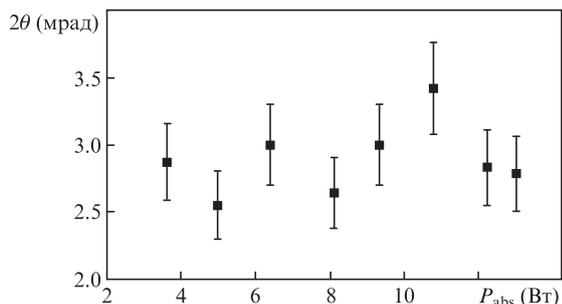


Рис.4. Зависимость полного угла 2θ расходимости излучения лазера от поглощенной мощности непрерывной накачки P_{abs} при $R = 88\%$.

[10, 11], в которых теоретически исследовался модовый состав излучения вырожденных резонаторов с гауссовым распределением усиления в активной среде и было показано, что моды низших порядков возбуждаются в них с наибольшим весом.

3.2. Резонатор с зеркалом с переменным коэффициентом отражения

Коэффициент отражения области сферического зеркала, через которую осуществлялся вывод излучения из резонатора, составлял 95% . Это значение являлось близким к оптимальному для резонатора с дополнительным зеркалом. Зависимости выходной мощности при непрерывном и квазинепрерывном режимах накачки лазера с резонатором, изображенным на рис.2,б, представлены на рис.5. Наивысшая эффективность генерации в непрерывном режиме составила 28% ($\eta_{dif} = 34\%$). В импульсно-периодическом режиме работы $\eta = 33\%$ при $\eta_{dif} = 42\%$.

Экспериментально измеренное значение расходимости выходного излучения оказалось равным ~ 3 мрад (рис.6) и как и в случае резонатора с дополнительным зеркалом, практически не зависело от режима работы лазера и поглощенной в ДАЭ мощности накачки. Расчетное значение полной расходимости 2θ по уровню 0.5, полученное для наших экспериментальных условий, равнялось 2.5 мрад при параметре качества пучка $M^2 \approx 1.2$.

Результаты экспериментальных исследований показали, что выходные параметры лазера с вырожденной конфигурацией резонатора (рис.2,б) менее подвержены влиянию термонаведенной в АЭ линзы. Так, во всем используемом диапазоне непрерывной суммарной мощности накачки (до 23 Вт) и при достаточно большой толщине активного Nd:GGG-элемента (1.5 мм) срыва генерации не наблюдалось. В то же время при использовании трех-

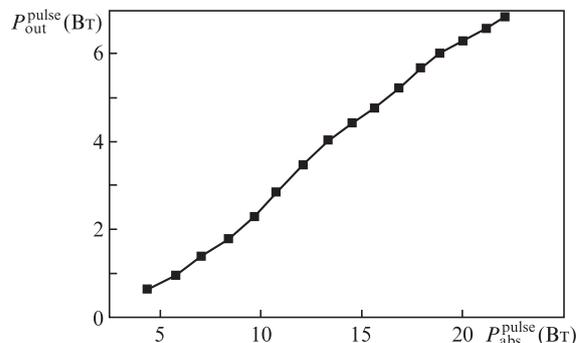
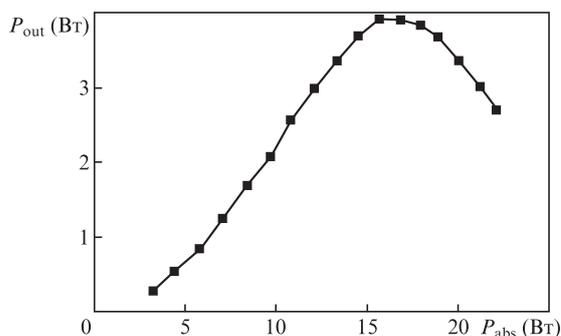


Рис.5. Зависимости непрерывной P_{out} (а) и импульсной P_{out}^{puls} (б) выходных мощностей излучения от суммарной поглощенной непрерывной (P_{abs}) и импульсной (P_{abs}^{puls}) мощностей накачки соответственно при $R = 95\%$.

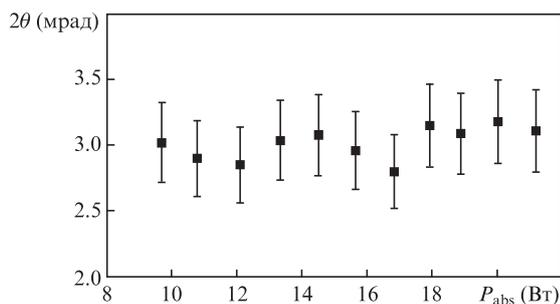


Рис.6. Зависимость полного угла 2θ расходимости излучения лазера от поглощенной в АЭ мощности накачки при квазинепрерывном режиме работы и $R = 95\%$.

зеркальной схемы резонатора (рис.2,а) срыв генерации имел место уже при суммарной мощности непрерывной накачки 8 Вт. Этот вывод подтверждается результатами расчетов, выполненных для данных резонаторов. Результаты расчетов зависимости полной расходимости лазера от оптической силы линзы, термонаведенной в каждом из каналов генерации АЭ, для обоих типов резонатора с описанными выше параметрами приведены на рис.7. Расчеты были выполнены в приближении тонких линз, локализованных в непосредственной близости от поверхности высокоотражающего плоского зеркала. Наблюдаемое различие в поведении двух типов лазеров было связано с наличием более длинного плеча 3–32 в резонаторе с дополнительным выходным зеркалом.

Итак, создан и исследован дисковый лазер с трехпучковой диодной накачкой и вырожденной конфигурацией резонатора с одноканальным выводом излучения, реализованным двумя разными способами. Изучены энергетические и пространственные характеристики лазерного излучения при непрерывном и импульсно-периодическом режимах накачки. Максимальная эффективность генерации составила 35% (дифференциальная эффективность 44%). Параметр качества пучка M^2 был равен 1.2. Продемонстрирована возможность использования вырожден-

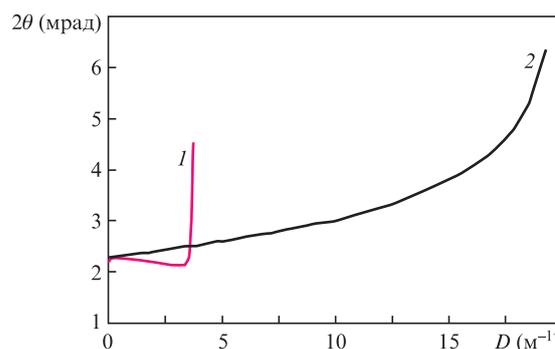


Рис.7. Зависимости полного угла 2θ расходимости излучения лазера с резонатором с дополнительным зеркалом (1) и с двухзеркальным резонатором (2) от оптической силы D линзы, термонаведенной в каждом из каналов накачки ДАЭ.

ной конфигурации резонатора и многопучковой диодной накачки дискового активного элемента для создания эффективного лазера с высоким качеством выходного излучения.

- Giesen A., Hugel H., Voss A., Wittig K., Brauch U., Opower H. *Appl. Phys. B*, **58**, 365 (1994).
- Гарнов С.В., Михайлов В.А., Серов Р.В., Смирнов В.А., Цветков В.Б., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **37**, 910 (2007) [*Quantum Electron.*, **37**, 910 (2007)].
- Николаев Д.А., Пивкина М.А., Цветков В.Б. *Прикладная фотоника*, **2** (1), 44 (2015).
- Herriott D., Kogelnik H., Kompfner R. *Appl. Opt.*, **3** (4), 523 (1964).
- Ramsay I.A., Degnan J.J. *Appl. Opt.*, **9** (2), 385 (1970).
- Dingjan J., Exter V.P., Woerdam J.P. *Opt. Commun.*, **188**, 345 (2001).
- Васильев А.Б., Корниенко Л.С., Короленко П.В. *Оптика и спектроскопия*, **63**, 214 (1987).
- Короленко П.В., Федотов Н.Н., Шарков В.Ф. *Квантовая электроника*, **22**, 562 (1995) [*Quantum Electron.*, **25**, 536 (1995)].
- Chen C.H., Huang P.Y., Kuo C.W. *J. Opt.*, **12**, 015708 (2010).
- Малютин А.А. *Квантовая электроника*, **37**, 299 (2007) [*Quantum Electron.*, **37**, 299 (2007)].
- Малютин А.А. *Квантовая электроника*, **38**, 181 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 181 (2008)].