

05:07

## Мощные твердотельные лазеры на Nd:YAG с поперечной диодной накачкой и улучшенным качеством излучения

© И.В. Глухих,<sup>1</sup> С.А. Димаков,<sup>2</sup> Р.Ф. Курунов,<sup>1</sup> С.С. Поликарпов,<sup>1</sup> С.В. Фролов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, 196641 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: glukhikh@mit.niefa.spb.su

<sup>2</sup> Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, 199034 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: dimakov42@yahoo.com

(Поступило в Редакцию 23 декабря 2010 г.)

Разработаны и исследованы Nd:YAG-лазеры с поперечной диодной накачкой цилиндрического активного элемента. Для накачки использовались сборки линеек лазерных диодов, работающие в непрерывном режиме. При мощности накачки 500, 820 и 1400 W разработанные лазеры позволили получить в режиме многодомовой генерации мощность излучения 150, 350 и 500 W соответственно. Оптический КПД превысил 30%. При использовании неустойчивого резонатора отрицательной ветви диаграммы устойчивости получена мощность излучения 320 W с расходимостью лазерного пучка, лишь в 2 раза превышающей дифракционный предел. Также разработана конструкция Nd:YAG-лазера с накачкой активного элемента сборками из матриц лазерных диодов импульсно-периодического режима работы суммарной энергией накачки 5 J, длительности импульса 250  $\mu$ s и частоте следования импульсов до 100 Hz.

### Введение

Вреди разработанных в настоящее время лазеров твердотельные лазеры (ТТЛ) занимают лидирующее место по объему производства. Мощные непрерывные ТТЛ могут использоваться в различных технологических процессах благодаря компактности и надежности конструкции, стабильности параметров и возможности применения гибких волокон для доставки излучения до объекта воздействия. Они нашли широкое применение для обработки материалов, в медицине, научных исследованиях, лазерных системах с преобразованием частоты излучения.

Появление в конце 80-х годов мощных лазерных диодов (ЛД) позволило создавать малогабаритные блоки диодной накачки (ДН) с выходной мощностью до 10 kW и разрабатывать на их основе ТТЛ киловаттного уровня мощности. Высокая квантовая эффективность и узкая ширина линии генерации ЛД позволяют осуществлять селективную накачку в линию поглощения активного элемента (АЭ) с высоким оптическим КПД, достигая значения  $\sim 50\%$  [1]. Основные направления развития ТТЛ ДН были рассмотрены в работах [2,3].

В мощных ТТЛ с цилиндрическим АЭ обычно применяется поперечная накачка. При этом важнейшим фактором, определяющим КПД лазера, является эффективность доставки излучения полупроводниковых излучателей к АЭ. Для этой цели используются цилиндрические микролинзы, волоконные системы, волноводные пластины, параболические и призматические фокусаторы [4,5]. Указанные системы ввода излучения накачки вносят серьезные потери, основными из которых являются потери на отражение и поглощение. Кроме того, усложняется конструкция излучателя.

В настоящей работе экспериментально исследована эффективность генерации Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазеров, работающих в непрерывном режиме с поперечной накачкой АЭ, излучением лазерных диодных модулей, располагающихся вблизи боковой поверхности кристалла, без использования сложных вспомогательных оптических систем. Также разработана конструкция Nd:YAG-лазера с накачкой активного элемента сборками из матриц лазерных диодов импульсно-периодического режима работы.

### Конструкция и характеристики ТТЛ ДН

Применение линеек лазерных диодов (ЛЛД) для накачки вызывает трудности, связанные со сложностью размещения большого количества ЛЛД относительно АЭ, а также их питания, охлаждения и юстировки. Для создания ТТЛ различного уровня мощности разработаны диодные модули накачки, работающие в непрерывном режиме с выходной мощностью излучения 100, 280 и 760 W на основе ЛЛД Silver Bullet (SB) фирмы Cutting Edge Optonics (США). Модули с мощностью 100 W разработаны с использованием базового элемента ASM01C020 с мощностью излучения 20 W. В модулях с мощностью излучения 280 и 760 W использованы вдвоенные ЛЛД типа ASM01C040, каждая из которых имеет мощность генерации 40 W. Ширина линии излучения ЛЛД составляла  $\sim 2$  nm с максимумом на длине волны 805 nm при температуре 25°C.

Базовые элементы ASM01C020 и ASM01C040, представленные на рис. 1, монтировались на специально разработанные теплоотводы с интенсификаторами теплообмена [6]. Интенсификация теплообмена достигалась путем оребрения внутренней стенки теплообменника с

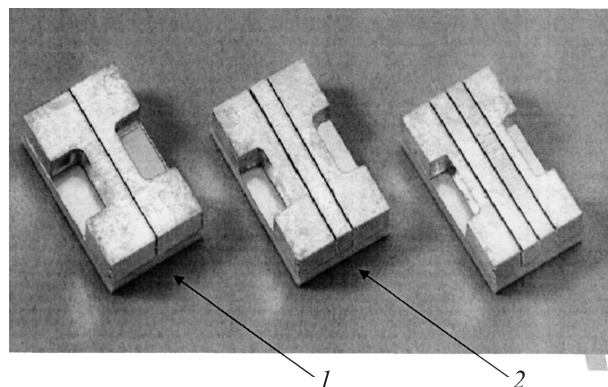


Рис. 1. Базовые элементы модулей диодной накачки ASM01C020 (1) и ASM01C040 (2).

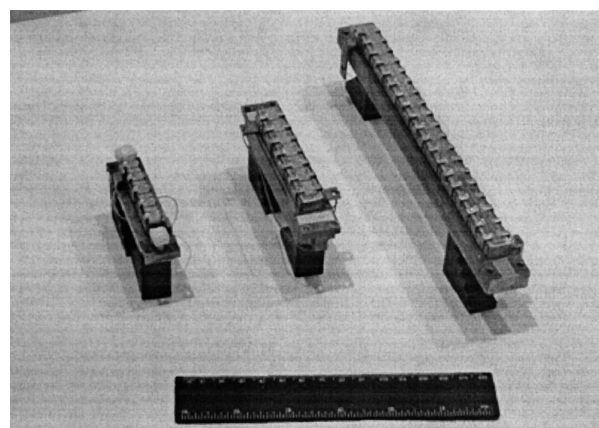


Рис. 2. Модули диодной накачки с мощностью 100, 280 и 760 W.

шагом  $500 \mu\text{m}$ , выполненного электроэрозионным способом. Применяемая в теплообменнике структура оребрения позволяет при расходах воды  $\sim 10 \text{ g/s}$  обеспечить интенсивность теплообмена на уровне  $20 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$  [7]. Изготовленные модули диодной накачки показаны на рис. 2.

Указанные в табл. 1 модули использовались для поперечной накачки цилиндрических АЭ в излучателях Nd:YAG-лазеров. АЭ располагался внутри кварцевого отражателя, на наружную поверхность которого наносились зеркальные покрытия с щелевыми просветленными каналами вдоль образующей цилиндра для ввода излучения накачки. Модули накачки монтировались вплотную к каналам ввода излучения. Были разработаны три варианта излучателей на расчетную мощность излучения 100, 300 и 500 W. Конструктивные данные излучателей показаны в табл. 2.

АЭ и модули диодной накачки охлаждались дистиллированной водой, температура которой стабилизировалась с точностью  $0.5^\circ\text{C}$  и могла перестраиваться в интервале  $15\text{--}25^\circ\text{C}$  для согласования излучения накачки с полосой поглощения Nd:YAG.

Для формирования излучения использовался резонатор длиной 15 см, состоящий из плоских зеркал. Оптимальный коэффициент отражения выходного зеркала для разных излучателей составил 80–90%. Технические характеристики излучателей с диодной накачкой показаны в табл. 3.

Кроме того, был разработан и изготовлен излучатель с пятью модулями накачки КЛ4-760 суммарной мощностью 3.8 kW на расчетную мощность излучения 1 kW. Фотография излучателей мощностью 150, 315 и 1000 W показана на рис. 3.

Также была разработана конструкция излучателя с поперечной накачкой активного элемента пятью модулями матриц лазерных диодов СЛМ-3 производства ОАО „НПП Инжект“ (Саратов). Суммарная импульсная мощность накачки — 20 kW, длительность импульса —  $250 \mu\text{s}$ , частота следования импульсов до 100 Hz. Энергия импульса накачки — 5 J.

Эскизы общего вида излучателя приведены на рис. 4. Активный элемент 5 из кристалла Nd:YAG  $\varnothing 10 \text{ mm}$  и длиной 110 mm закрепляется с торцов в коронки 9 и помещается в кварцевый отражатель 4, наружная образующая которого покрывается серебром и защитным слоем меди и никеля. Накачка лазерного кристалла осуществляется поперечно пятью диодными сборками 1 импульсной мощностью 4 kW каждая при длительности импульса  $250 \mu\text{s}$  и частоте следования импульсов

Таблица 1. Технические данные модулей диодной накачки

Тип модуля	Мощность излучения, W	Длина волны, nm	Напряжение питания, V	Номинальный ток, A
КЛ4-100	100	$805 \pm 2$	10	25
КЛ4-280	280		25	
КЛ4-760	760		70	

Таблица 2. Конструктивные данные излучателей с диодной накачкой

Тип излучателя	Размеры активного элемента, mm	Тип/количество модулей накачки	Размеры излучателя (Д × Ш × В), mm
КЛ4-100Л	$\varnothing 4 \times 80$	КЛ4-100/5	$150 \times 50 \times 100$
КЛ4-300Л	$\varnothing 6 \times 80$	КЛ4-280/3	$150 \times 120 \times 130$
КЛ4-500Л	$\varnothing 6 \times 100$	КЛ4-280/5	$200 \times 120 \times 130$

Таблица 3. Технические характеристики излучателей с диодной накачкой

Тип излучателя	Длина волны излучения, nm	Мощность накачки, W	Мощность излучения, W	Оптический КПД, %
КЛ4-100Л	1064	500	150	30
КЛ4-300Л		840	315	37
КЛ4-500Л		1400	500	36

до 100 Hz. Суммарная импульсная мощность накачки составляет 20 kW. Доставка излучения накачки до активного элемента осуществляется коническими линзами 3 через щелевые окна отражателя. Все элементы монтируются между уплотнительными фланцами 6–8, которые обеспечивают жесткость конструкции усилителя.

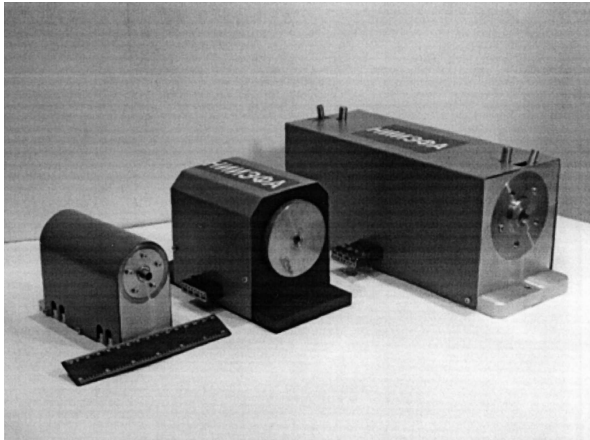


Рис. 3. Излучатели с мощностью излучения 150, 315 и 1000 W.

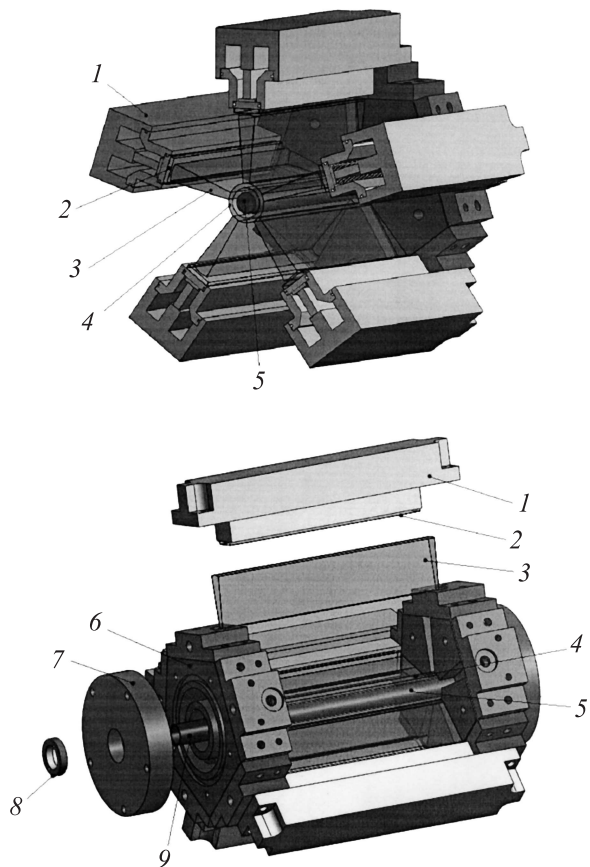


Рис. 4. Общие виды излучателя: 1 — модуль диодных матриц, 2 — излучающая поверхность диодных матриц, 3 — конусная линза, 4 — отражатель, 5 — активный элемент, 6, 7 — фланцы крепления, 8, 9 — детали уплотнения активного элемента.

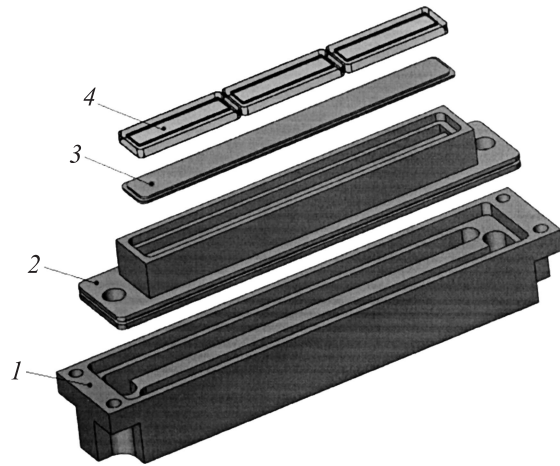


Рис. 5. Сборка из матриц лазерных диодов СЛМ-3: 1 — корпус, 2 — радиатор, 3 — крышка радиатора, 4 — матрица лазерных диодов.

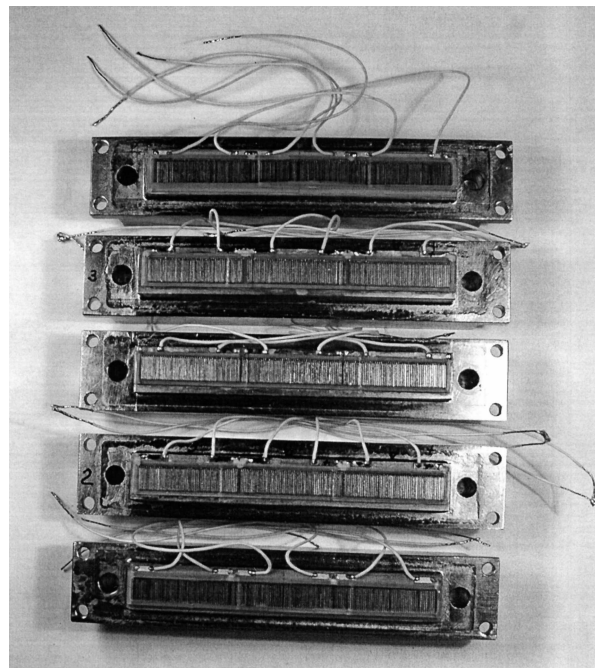


Рис. 6. Фотография модулей накачки.

Выполнены испытания модулей диодных матриц. Исследуемые модули представляют собой двумерные матрицы лазерных диодов, питаемые на микроканальный водоохлаждаемый блок рис. 5.

Каждый модуль состоит из трех матриц лазерных диодов, соединенных последовательно, общая площадь излучающей поверхности модуля  $\sim 3.75 \text{ cm}^2$ . Для охлаждения модуля использовался чиллер RRS-0250-AC Bay Voltex Corporation, обеспечивающий расход воды до 20 l/min и стабилизацию температуры охлаждающей жидкости  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Фотография модулей представлена на рис. 6.



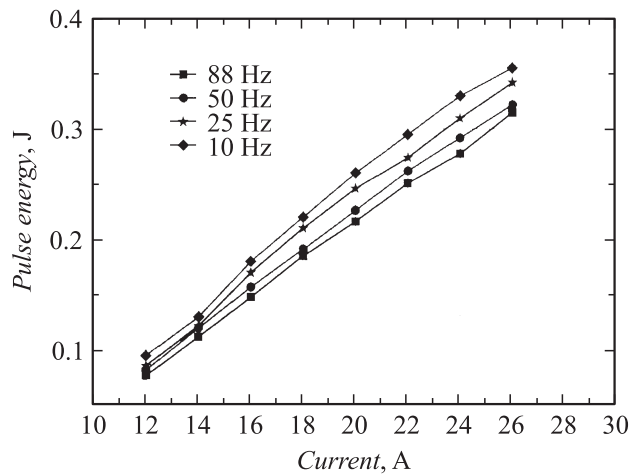


Рис. 7. Зависимость энергии импульса излучения матрицы лазерных диодов СЛМ-3 от тока накачки.

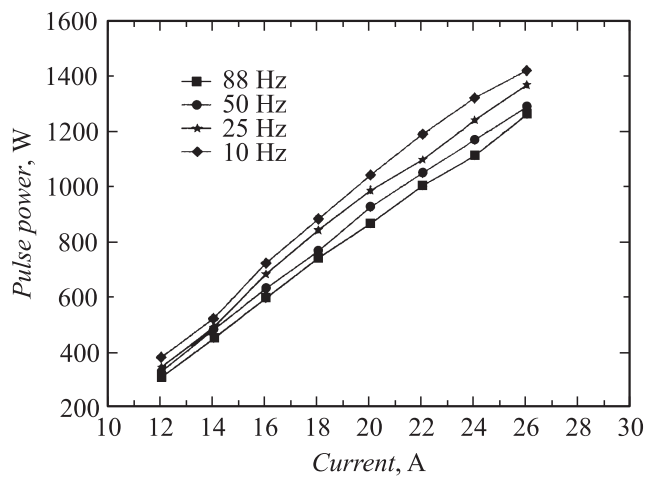


Рис. 8. Ватт-амперные характеристики матрицы лазерных диодов СЛМ-3.

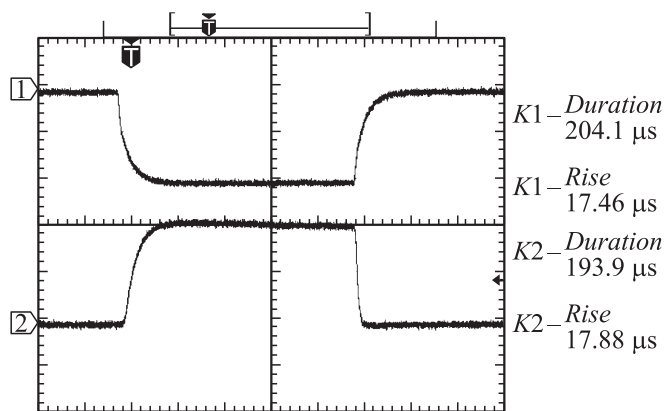


Рис. 9. Осциллограммы импульса тока (верхняя кривая) и импульса генерации матрицы (нижняя).

На рис. 7 показаны зависимости энергии импульса излучения одной матрицы лазерных диодов при токах 12–26 А, длительности импульса 250 μs и частотах следования импульсов 10–88 Hz.

Максимальная энергия импульса одной матрицы достигается при токе 26 А и составляет 0.32–0.35 J. При этом суммарная энергия накачки активного элемента составляет 4.8–5.25 J.

Ватт-амперные характеристики показаны на рис. 8. При номинальном токе 26 А импульсная мощность излучения одной матрицы составила 1250–1420 W, а суммарная мощность накачки — 18.75–21.3 kW.

Характерная осциллограмма импульса тока накачки и импульса генерации матрицы лазерных диодов представлена на рис. 9.

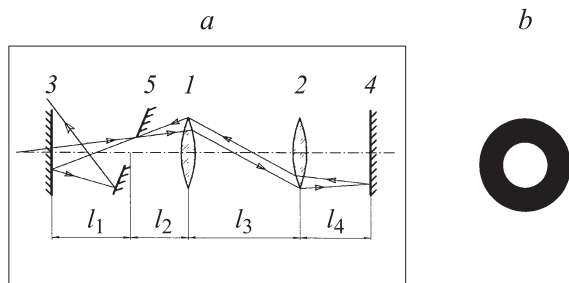
Импульсы тока и генерации фиксировались на осциллографе Tektronik с полосой пропускания 500 МГц. Импульс генерации измерялся скоростным фотодиодом с временным разрешением 1 ns.

### ТТЛ ДН с улучшенным качеством излучения

Традиционные ТТЛ с ламповой накачкой обладают низкой эффективностью, и угловая расходимость излучения таких лазеров в 20–100 раз превышает дифракционный предел. Это обстоятельство не позволяет в полной мере реализовать преимущества технологических операций, требующих высокой степени концентрации излучения. В то же время лазеры ближнего ИК-диапазона представляют значительный интерес в связи с более высоким поглощением лазерного излучения большинством материалов, применяемых в промышленности. Диодная накачка несколько улучшает качество генерируемого излучения, однако в разработанных лазерах из-за наведенных термических линз в зависимости от уровня накачки расходимость излучения в 5–10 раз превышает дифракционный предел.

В реальности в подавляющем большинстве случаев требуется или доставка лазерного излучения на большие расстояния без существенных потерь, или его фокусировка в пятно минимальных размеров. Так, например, опыт эксплуатации технологических установок на основе мощных ТТЛ показывает, что для реализации преимуществ лазерных технологий необходимо уменьшение расходимости излучения лазера с минимально возможными потерями выходной мощности. Обзор современного состояния этой проблемы показывает, что высокое качество пучка может быть достигнуто за счет усовершенствования конструкции резонатора, а также за счет исключения или компенсации вредного влияния тепловой линзы.

Результаты первых экспериментов с устойчивыми резонаторами показали, что их применение в условиях сильно наведенной термооптики активной среды не позволяет получить малую расходимость выходного излучения при высоком уровне мощности. Однако известно [8],



**Рис. 10.** Оптическая схема неустойчивого резонатора (а) и апертура выходного излучения (b): 1, 2 — термолинзы активных элементов, 3, 4 — отражающие зеркала, 5 — выводное зеркало с отверстием.

что в лазерах с неоднородными средами использование неустойчивых резонаторов отрицательной ветви диаграммы устойчивости приводит к уменьшению угловой расходимости. Экспериментально для твердотельного лазера импульсно-периодического действия это было показано в работе [9].

В данной работе представлены результаты исследования энергетических и пространственных характеристик излучения твердотельных лазеров с диодной накачкой непрерывного действия. Измерения проводились на ТТЛ с двумя лазерными головками для устойчивого и неустойчивого вариантов резонатора.

В технологических твердотельных лазерах традиционно используется самосопряженный плоский резонатор, работающий, как правило, в многомодовом режиме генерации. Расстояния в оптической схеме этого резонатора подобраны так, что каждое зеркало изображается само на себя наведенными в активных элементах термическими линзами. Этот резонатор обладает высокой энергетической эффективностью, но не может обеспечить малую расходимость выходного излучения из-за многомодового режима генерации. Две лазерные головки по 300 W каждая в описанном резонаторе обеспечили выходную мощность генерации 500 W и расходимость излучения по уровню 0.8 полной мощности 11.5 mrad. Эта расходимость превышает дифракционный предел в 25 раз.

С другой стороны, известно, что в лазерах с неоднородными средами использование неустойчивых резонаторов отрицательной ветви диаграммы устойчивости приводит к уменьшению угловой расходимости, которое сопровождается лишь небольшим падением энергетической эффективности.

Оптическая схема (рис. 10) неустойчивого резонатора, образованного полностью отражающими плоскими зеркалами и выводным зеркалом с отверстием обратной связи, была использована для ТТЛ с диодной накачкой с теми же двумя лазерными головками.

Отверстие выводного зеркала 5 изображается само на себя элементами 1, 2 и 4. Выполнение условия самоизображения отверстия ( $l_2 = f$  и  $l_4 = f$ ) позволяет практически без потерь мощности пропустить через него пучок, распространяющийся со стороны активного

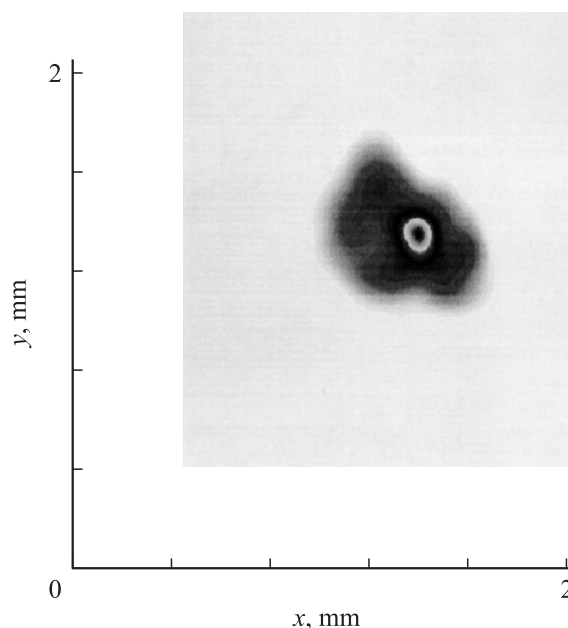
элемента 1. Диаметр отверстия  $d$  не превышает диаметр сечения активных элементов с целью обеспечения оптимального заполнения их объема излучением. Расстояние  $l_1$  выбирается исходя из требуемого уровня расходимости излучения, верхний предел которого равен  $d/2l_1$ . Необходимое увеличение  $M$  при заданном расстоянии  $l_1$  реализуется выбором расстояния  $l_3$  между активными элементами. Для случая одинаковых фокусных расстояний  $f$  тепловых линз, что, как правило, реализуется на практике,  $l_3 = 2f - f^2(M - 1)^2/4Ml_1$ .

При расстройке от софокусного расположения активных элементов  $\Delta = -f^2(M - 1)^2/4Ml_1 > 0$ , ( $M < 0$ ), резонатор эквивалентен резонатору, состоящему из плоского и вогнутого зеркал, расположенных на расстоянии  $l_1$  друг от друга, причем радиус кривизны вогнутого зеркала  $R = f^2/\Delta$ .

Со стороны левого зеркала 3 в сторону зеркала 5 распространяется расходящаяся сферическая волна. На поверхности зеркала 5 диаметр этой волны в  $M$  раз превышает диаметр отверстия, а центр ее кривизны находится от этого зеркала на расстоянии  $2l_1M/(M - 1)$ . Центральная часть волны проходит через отверстие в зеркале и служит для осуществления обратной связи в резонатор, а остальная часть выходит из резонатора в качестве полезного излучения. При необходимости отражающей поверхности зеркала 5 придается кривизна, компенсирующая сферическую составляющую падающей на него волны.

В эксперименте наилучшие результаты были получены при  $d = 5$  mm,  $l_1 = 1$  m,  $l_3 = 0.75$  m и  $M = -1.8$ . Таким образом, апертура выходного излучения представляла собой кольцо внутренним диаметром 5 mm и наружным диаметром 9 mm (рис. 10).

На рис. 11, 12 показаны типичное распределение интенсивности света, генерируемого лазером в даль-



**Рис. 11.** Изображение дальней зоны излучения ТТЛ с неустойчивым резонатором.

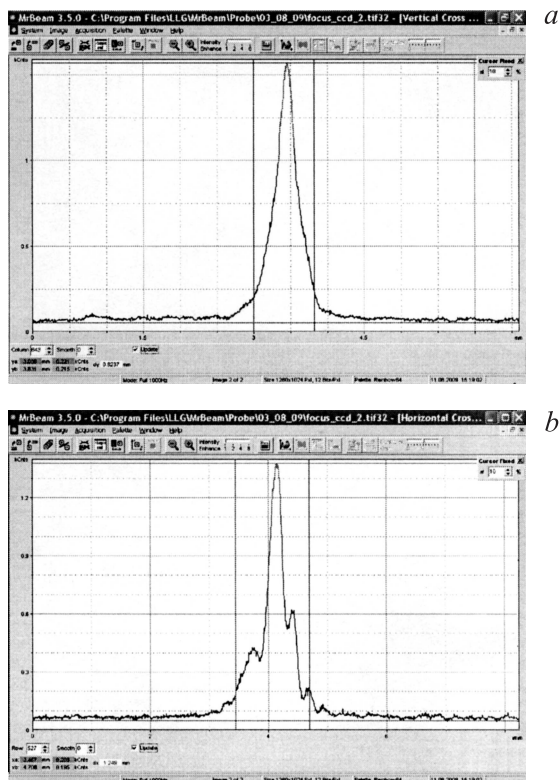


Рис. 12. Сечения распределения интенсивностей излучения в дальней зоне по координатам  $x$  (а) и  $y$  (б).

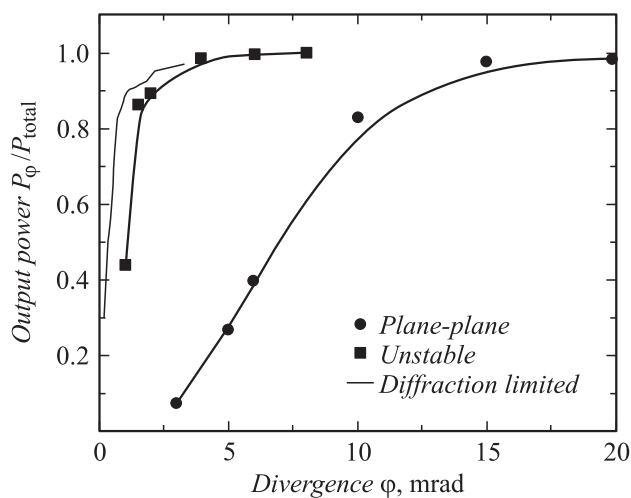


Рис. 13. Экспериментальные результаты измерения расходимости излучения.

ней зоне (в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием  $F = 1250 \text{ mm}$ ), и сечения распределения интенсивности фокального пятна по  $x$  и  $y$  координатам соответственно.

На рис. 13 представлены расчетные и экспериментальные результаты, характеризующие расходимость лазерного излучения. Для сравнения показаны зависимости доли мощности излучения от величины угла конуса

Таблица 4. Параметры лазерного излучения

Схема резонатора	$P, \text{ W}$	$\varphi, \text{ mrad}$	$W, \text{ MW/sr}$
Устойчивый	500	11.5	4.8
Неустойчивый	300	1.6	149.2

распространения света для идеального пучка с кольцевой формой выходного излучения, экспериментальные кривые для плоского сопряженного резонатора и исследуемого неустойчивого резонатора. Хорошо видно уменьшение расходимости излучения при использовании неустойчивого резонатора.

Мощность излучения лазера с неустойчивым резонатором уменьшилась от 500 до 300 W, а расходимость по уровню мощности 0.86 уменьшилась от 12 до 1.6 mrad. Это значение соответствует лишь 2-кратному превышению дифракционного предела. При этом средняя сила света увеличилась более чем в 30 раз.

Параметры выходного излучения ТТЛ при токе накачки  $I = 25 \text{ A}$  приведены в табл. 4.

В таблице указаны мощность  $P$ , расходимость  $\varphi$  по уровню 0.86  $P$  и средняя сила света  $W = 4P/\pi\varphi^2$ .

## Заключение

Разработан типоряд мощных непрерывных Nd:YAG-лазеров с поперечной накачкой активного элемента сборками лазерных диодных линеек. Достигнута максимальная выходная мощность генерации 150, 315 и 500 W при оптическом КПД, превышающим 30%.

Показано, что применение неустойчивого резонатора отрицательной ветви диаграммы устойчивости позволило более чем в 30 раз повысить осевую силу лазерного излучения, что существенно увеличит эффективность применения ТТЛ ДН, например, в технологических лазерных установках.

## Список литературы

- [1] Lee S., Choi D., Kim C.-J., Zhou J. // Opt. Laser Technol. 2007. Vol. 39. P. 705.
- [2] Кравцов Н.В. // Квант. электрон. 2001. Т. 31. С. 661.
- [3] Гречин С.Г., Николаев П.П. // Квант. электрон. 2009. Т. 39. С. 1.
- [4] Golla D., Rnoka S. et al. // Appl. Phys. B. 1991. Vol. 58. P. 389.
- [5] Konno S., Inoue Y. et al. // Appl. Opt. 2001. Vol. 40. P. 4341.
- [6] Глухих И.В., Поликарпов С.С., Фролов С.В., Волков А.С., Привезенцев В.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 101–105.
- [7] Глухих И.В., Копина Е.А. и др. Сб. статей 7-го Белорусско-Российского семинара „Полупроводниковые лазеры и системы“. 2009. С. 84.
- [8] Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990. 264 с.
- [9] Dimakov S.A., Gorlanov A.V. et al. // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2095. P. 184–187.