

УДК 628.7.068:621.375

**Д.А. Николаев, М.Н. Пивкина, В.Б. Цветков**

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

## **ДИСКОВЫЙ ND:GGG ЛАЗЕР С МНОГОПУЧКОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ**

Предложена и исследована схема твердотельного дискового лазера с трехзонной диодной накачкой. Особенностью данной схемы является то, что все области инверсной населенности активного элемента связаны между собой единым пучком, замкнутым через цикл облетов резонатора и имеющим единственный канал выхода из резонатора. Результаты экспериментальных исследований приведены в сопоставлении с параметрами лазера с осевой одноточечной накачкой, измеренными на том же активном элементе.

**Ключевые слова:** твердотельные лазеры, дисковые активные элементы, многопучковая диодная накачка, вырожденный резонатор.

**D.A. Nikolaev, M.N. Pivkina, V.B. Tsvetkov**

A.M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

## **ND:GGG DISK LASER WITH MULTIPOINT OPTICAL PUMPING**

The scheme of solid state disk laser with a multipoint diode pumping is proposed and investigated. The feature of this scheme is that all the inverse population areas of the active disk are linked by a single off-axis intracavity beam. This beam is self-reproduced after the number of round-trips of the resonator and possesses the single output channel from the optical cavity. The results of experimental studies of the laser with three-point pumping are presented in comparison with the parameters of the laser with an axial single-point pumping of the same active disk.

**Keywords:** solid state laser, active disk, multipoint pumping, resonator.

### **Введение**

Одними из наиболее существенных факторов, ограничивающих эффективность генерации и качество выходного излучения мощных твердотельных лазеров с диодной накачкой, являются термонаведенные оптические эффекты, такие как термолинза и термодвулучепреломление. Использование тонких дисковых активных элементов (ДАЭ) позволило в определенной степени уменьшить влияние указанных

факторов [1, 2]. К дальнейшему снижению тепловой нагрузки на ДАЭ и уменьшению влияния термооптических эффектов может привести использование многозонной оптической накачки [3]. При этом, например, все области диска с инверсной населенностью могут быть связаны между собой геометрическими модами резонатора – единым внеосевым резонаторным пучком, который замыкается сам на себя после серии облетов резонатора [4–8]. В этом случае желательно, чтобы проходы внутрирезонаторного излучения через активный диск происходили только в пределах областей пятен накачки. Также желательно, чтобы вывод излучения из резонатора осуществлялся в виде одного единственного пучка. Для демонстрации возможности реализации этих условий мы использовали плоско-сферические резонаторы с комбинированным выходным зеркалом, состоящим из глухого промежуточного сферического зеркала с отверстием, за которым помещалось полупрозрачное выходное зеркало резонатора. Использовались две конфигурации резонатора, отличающиеся ориентацией промежуточного зеркала по отношению к оси резонатора. В первом случае это зеркало устанавливалось под углом, отличным от нормального по отношению к оси резонатора; во втором случае угол между осью резонатора и касательной к поверхности зеркала соответствовал нормальному. Исследования велись как в режиме генерации  $TEM_{00}$  моды, так и в многомодовом режиме.

### **Экспериментальные условия и результаты**

Оптическая схема эксперимента показана на рис. 1. Резонатор лазера был образован выходным зеркалом ( $M1$ ), промежуточным зеркалом с отверстием ( $M2$ ) и зеркалом ( $M3$ ) с коэффициентом отражения, близким к 100 % для длин волн накачки и генерации. Зеркало  $M3$  было нанесено на заднюю поверхность дискового активного элемента. Ход лучей в резонаторе дополнительно показан на рис. 2. Обозначения элементов на рис. 1 и 2 совпадают. На переднюю поверхность ДАЭ были нанесены просветляющие покрытия для излучения накачки и генерации. В качестве активного диска служил кристалл Nd:GGG диаметром 50 мм и толщиной 1,5 мм. Концентрация ионов  $Nd^{3+}$  составляла  $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Активный диск крепился к латунному водоохлаждаемому держателю при помощи пайки индием. Выходное и промежуточное зеркала являлись плоско-вогнутыми зеркалами с одинаковыми радиусами кривизны, равными  $r_1 = r_2 = 200$  мм. Диаметры обоих зеркал составляли 20 мм. Коэффициент отражения зеркала  $M2$  на длине волны

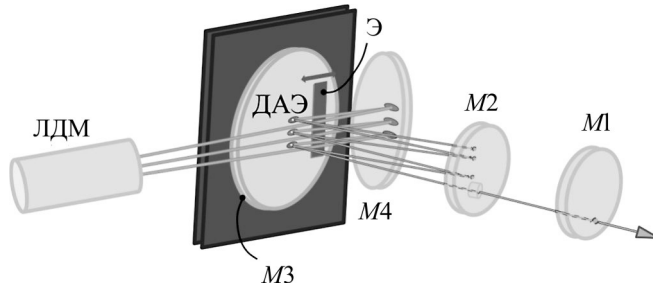


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента: ДАЭ – дисковый активный элемент;  $M1$  – выходное зеркало резонатора;  $M2$  – промежуточное зеркало с отверстием;  $M3$  – зеркало резонатора; ЛДМ – диодный модуль накачки с фокусирующей системой; Э – экран;  $M4$  – поворотное зеркало

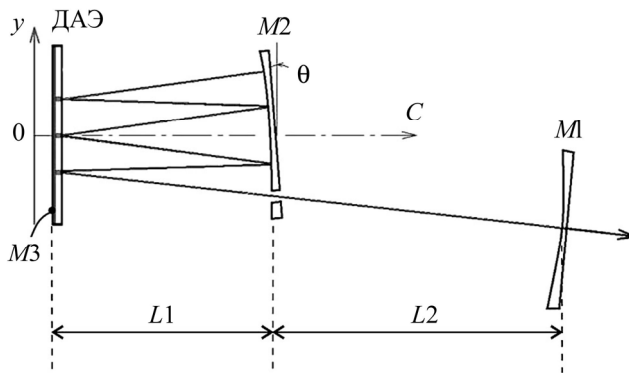


Рис. 2. Оптическая схема резонатора и ход лучей в нем

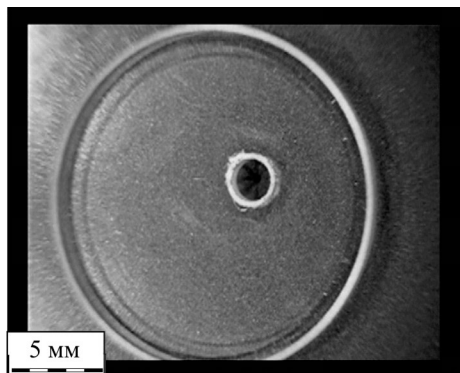


Рис. 3. Фотография поверхности промежуточного зеркала резонатора

1062 нм составлял более 99,6 %. На расстоянии 2,5 мм от центра промежуточного зеркала было просверлено отверстие диаметром 2,4 мм. Фотография зеркальной поверхности зеркала *M2* показана на рис. 3, из которого видно, что вокруг отверстия на зеркале присутствует дефектное кольцо. Толщина этого кольца была достаточно большой и составляла более 0,3 мм, что, к сожалению, негативно влияло на энергетические параметры генерации.

Три пучка диодной продольной накачки создавали в активном диске три области с инверсной населенностью. Источником излучения накачки служил один непрерывный лазерный диодный модуль (ЛДМ на рис. 1) JOLD-22-CPXF-1L с длиной волны излучения 808 нм и волоконным выводом излучения. Для создания трех зон накачки использовалась линзовая система, состоящая из фокусирующих сферических и цилиндрических линз. Фотографии пятен накачки на поверхности зеркала *M3* и поперечное распределение интенсивности в них показаны на рис. 4. Характерный поперечный размер пятен накачки составлял около 350 мкм, а расстояние между соседними пятнами было равно 1,1 мм. Выбор данной геометрии накачки был обусловлен тем, что в условиях нашего эксперимента поперечный размер пятен накачки примерно соответствовал поперечному размеру  $TEM_{00}$  пучков в активном элементе. Расстояния между соседними пучками накачки могли быть только одинаковыми и пропорциональными поперечным размерам самих пучков. Угол падения пучков накачки на поверхность ДАЭ отличался от нормального примерно на  $11^\circ$ . Мощности пучков накачки были неодинаковы. На верхний

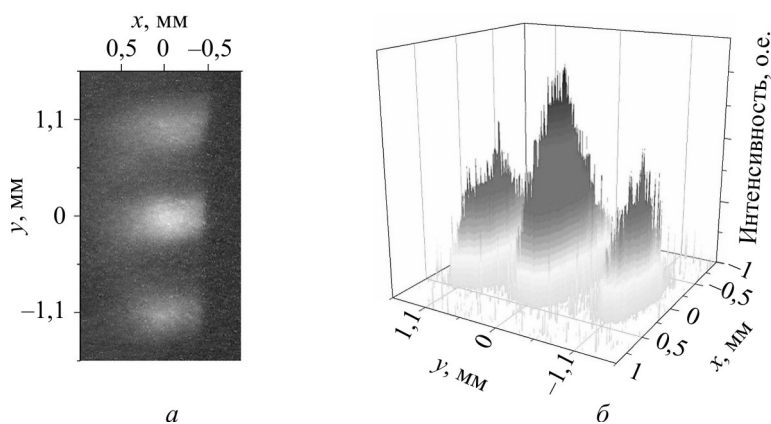


Рис. 4. Фотография пятен накачки в активном элементе (а) и поперечное распределение интенсивности в них (б)

из пучков на рис. 1, 2 приходилось около 28 % суммарной мощности, на средний – 45 % и на нижний – около 27 %.

Пятна накачки имели эллиптическую форму. Большие полуоси эллипсов лежали в горизонтальной плоскости. При работе в режиме генерации  $TEM_{00}$  моды горизонтальный размер пятен уменьшался при помощи экрана ( $S$  на рис. 1). За время полного цикла обхода луча по резонатору, после которого исходный луч воспроизводился, излучение совершало шесть однократных круговых облетов резонатора. Параметры резонатора рассчитывались таким образом, чтобы все три области двойных проходов излучения через активный диск максимально совпадали с зонами накачки.

### ***Резонатор с наклонной установкой промежуточного зеркала***

Для минимизации потерь внутрирезонаторного излучения на деффектном кольце вокруг отверстия в промежуточном зеркале  $M2$  это зеркало устанавливалось под небольшим углом  $\theta$  по отношению к оси  $S$  промежуточного резонатора, образованного зеркалами  $M2$  и  $M3$  (см. рис. 2). Значение угла  $\theta$  и длина  $L1$  промежуточного резонатора определялись условием, требующим замкнутости траектории внутрирезонаторного луча в соответствии со сценарием, показанном на рис. 2. Экспериментальные значения  $L1$  и  $\theta$  были выбраны компромиссно и составили 33 мм и  $0,11^\circ$  соответственно. Расстояние  $L2$  между зеркалами  $M1$  и  $M2$  было равно 171 мм и соответствовало такому расстоянию, при котором КПД генерации лазера имел максимальное значение. Поперечные размеры  $2\omega$  верхнего (см. рис. 1 и 2), среднего и нижнего  $TEM_{00}$  пучков генерации на зеркале  $M3$  составляли около 275, 425 и 400 мкм соответственно. Значение  $\Delta$  составляло примерно 1,2 мм, а радиусы  $\omega$  двух соответствующих нижних  $TEM_{00}$  пучков в плоскости зеркала  $M2$  были равны около 240 мкм и 180 мкм.

Экспериментально исследовалась зависимость выходной мощности генерации от мощности излучения накачки, поглощенной в ДАЭ. Измерения проводились как в режиме генерации  $TEM_{00}$  моды, так и в многомодовом режиме. Модовый состав излучения контролировался путем исследования поперечной структуры пучка в фокальной плоскости собирающей линзы с фокусным расстоянием, равным 1,3 м. В качестве выходных использовались зеркала с коэффициентами от-

ражения  $R$ , равными 75, 80, 85, 88, 94, 96, 98 %. Результаты измерений, полученные при использовании наиболее оптимального зеркала  $R = 94$  %, представлены на рис. 5 в виде кривых 1 и 2. Для сравнения на рис. 5 также приведены мощности генерации лазера с этим же активным диском, но с одним осевым пучком накачки и линейным двухзеркальным резонатором в одномодовом и многомодовом режимах (кривые 3 и 4 соответственно). В качестве выходного зеркала применялось сферическое зеркало с радиусом кривизны, равным 200 мм. Длина линейного двухзеркального резонатора составляла 33 мм. Условия генерации были примерно эквивалентны условиям генерации резонатора с комбинированным зеркалом. Коэффициент отражения выходного зеркала составлял 98 %. Как видно из описанных результатов, КПД лазера с трехзонной накачкой был меньше КПД генерации лазера с двухзеркальным резонатором и однопучковой осевой накачкой. Различие дифференциальных КПД генерации составляло примерно 1,8 раза в многомодовом режиме (18 против 32 %) и примерно 1,4 раза в одномодовом режиме (11 против 16 %). Результаты оценок показывают, что эти несоответствия были связаны как с потерями внутрирезонаторного излучения на дефектном кольце вокруг отверстия в промежуточном зеркале  $M2$  (которые выше в режиме многомодовой генерации), так и с неполным перекрытием областей накачки и лазерного излучения в активном дисковом элементе.

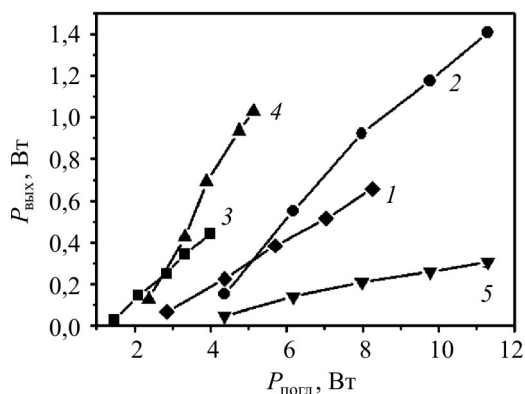


Рис. 5. Зависимость выходной мощности лазерной генерации  $P_{\text{вых}}$  от мощности излучения накачки, поглощенной в активном элементе  $P_{\text{погл}}$ : 1, 2 –  $\text{TEM}_{00}$  и многомодовая генерация лазера при наклонной установке промежуточного зеркала в резонаторе; 3, 4 –  $\text{TEM}_{00}$  и многомодовая генерация лазера с двухзеркальным резонатором и осевой однопучковой накачкой; 5 – лазер с вырожденной конфигурацией промежуточного резонатора

### ***Промежуточный резонатор с вырожденной конфигурацией***

В данном случае промежуточное зеркало устанавливалось ортогонально по отношению к оси резонатора. Для исключения развития генерации вдоль оси вспомогательного резонатора на оси  $C$  вблизи ее пересечения с зеркалом  $M2$  устанавливался непрозрачный экран с поперечным размером, равным 0,5 мм. Выходное зеркало устанавливалось за промежуточным на расстоянии  $L2 = 100$  мм. Длина  $L1$  промежуточного резонатора выбиралась с учетом трехзонной геометрии накачки ДАЭ и составляла 50 мм (отношение  $L1/r1 = 1/4$ ). Данная схема резонатора позволяет наиболее эффективно использовать схему симметричной трехпучковой накачки и осуществлять однопучковый вывод излучения генерации. Особенно интересным и перспективным представляется случай использования схемы вырожденного двухзеркального резонатора ( $L2 = 0$ ) с использованием единственного сферического зеркала с переменным коэффициентом отражения. При таких параметрах резонатора ( $L2 = 0$ ,  $L1/r1 = 1/4$ ) любой луч должен автоматически возвращаться на свою начальную траекторию после шести круговых облетов резонатора ( $T^6 \equiv \mathbf{1}$ , где  $T$  – ABCD-матрица кругового облета резонатора, а  $\mathbf{1}$  – единичная матрица), а после трех круговых облетов любой луч должен трансформироваться в луч, симметричный самому себе относительно оси  $C$  ( $T^3 \equiv -\mathbf{1}$ ). Данная конфигурация позволяет реализовывать однопучковый вывод излучения из резонатора.

Экспериментально исследовалась зависимость мощности лазерного излучения от мощности излучения накачки, поглощенной в активном диске. Эта зависимость для случая генерации  $TEM_{00}$  моды показана на рис. 5 в виде кривой 5. Дифференциальный КПД генерации был относительно низким и составлял около 4 %. Это объяснялось тем, что расстояние  $\Delta$  в наших условиях было равно примерно 0,7 мм. Радиусы  $\omega$  двух нижних на рис. 1 и 2 лазерных пучков в плоскости зеркала  $M2$  составляли около 170 и 200 мкм соответственно. Это приводило к тому, что потери внутрирезонаторного излучения на дефектном кольце отверстия в промежуточном зеркале были крайне велики. По этой же причине нам не удалось реализовать режим многомодовой генерации.

### **Заключение**

Предложена схема лазерного резонатора с многозонной диодной накачкой, в которой все области с инверсной населенностью дискового активного элемента принимают коллективное сфазированное участие в генерации единого выходного пучка. Из двух рассмотренных вариантов схемы наиболее предпочтительным представляется применение схемы с вырожденной конфигурацией резонатора. При использовании специально изготовленных зеркал с переменным по поверхности коэффициентом отражения возможно получение генерации излучения высокого качества с КПД, не уступающим простым многомодовым резонаторам.

### **Список литературы**

1. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state laser / A. Giesen, H. Hugel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, H. Opower // *Appl. Phys.* – 1994. – В58. – P. 365–372.
2. Распределение температуры в дисковых активных элементах лазеров с продольной диодной накачкой / Г.А. Буфетова, Д.А. Николаев, В.Б. Цветков, И.А. Щербаков // *Краткие сообщения по физике.* – 2008. – № 4. – С. 25–28.
3. Исследование возможности создания мультикиловаттного твердотельного лазера с многоканальной диодной накачкой на основе оптически плотных активных сред / С.В. Гарнов, В.А. Михайлов, Р.В. Серов, В.А. Смирнов, В.Б. Цветков, И.А. Щербаков // *Квантовая электроника.* – 2007. – Т. 37, № 10. – С. 910–915.
4. Herriott D., Kogelnik H., Kompfner R. Off-axis path in spherical mirrors interferometer // *Applied Optics.* – 1964. – Vol. 3, no. 4. – P. 523–526.
5. Ramsay I.A., Degnan J.J. A ray analysis of optical resonators formed by two spherical mirrors // *Applied Optics.* – 1970. – Vol. 9, no. 2. – P. 385–388.
6. Dingjan J., Exter V.P., Woerdam J.P. Geometric modes in single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser // *Optics Communication.* – 2001. – No. 188. – P. 345–351.
7. Wave representation of geometrical laser beam trajectories in a hemiconfocal cavity / Y.F. Chen, C.H. Jiang, Y.P. Lan, K.F. Huang // *Phys. Rev.* – 2004. – A69, 053807.



8. Chen C.H., Huang P.Y., Kuo C.W. Geometric modes outside the multi-bouncing fundamental Gaussian beam model // *J. Opt.* – 2010. – No. 12, 015708.

### References

1. Giesen A., Hugel H., Voss A., Wittig K., Brauch U., Opower H. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state laser. *Appl. Phys.*, 1994, B58, pp. 365-372.

2. Bufetova G.A., Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B., Shcherbakov I.A. Raspredelenie temperatury v diskovykh aktivnykh elementakh lazerov s prodol'noi diodnoi nakachkoi [The temperature distribution in the disk active elements of lasers with longitudinal diode pumping]. *Kratkie soobshcheniia po fizike*, 2008, no. 4, pp. 25-28.

3. Garnov S.V., Mikhailov V.A., Serov R.V., Smirnov V.A., Tsvetkov V.B., Shcherbakov I.A. Issledovanie vozmozhnosti sozdaniia mul'tikilovattnogo tverdotel'nogo lazera s mnogokanal'noi diodnoi nakachkoi na osnove opticheski plotnykh aktivnykh sred [Study of the possibility of developing a multichannel-diode-pumped multikilowatt solid-state laser based on optically dense active media]. *Kvantovaiia elektronika*, 2007, vol. 37, no 10, pp. 910-915.

4. Herriott D., Kogelnik H., Kompfner R. Off-axis path in spherical mirrors interferometer. *Applied Optics*, 1964, vol. 3, no. 4, pp. 523-526.

5. Ramsay I.A., Degnan J.J. A ray analysis of optical resonators formed by two spherical mirrors. *Applied Optics*, 1970, vol. 9, no. 2, pp. 385-388.

6. Dingjan J., Exter V.P., Woerdam J.P. Geometric modes in single-frequency Nd:YVO4 laser. *Optics Communication*, 2001, no. 188, pp. 345-351.

7. Chen Y.F., Jiang C.H., Lan Y.P., Huang K.F. Wave representation of geometrical laser beam trajectories in a hemiconfocal cavity. *Phys. Rev.*, 2004, A69, 053807.

8. Chen C.H., Huang P.Y., Kuo C.W. Geometric modes outside the multi-bouncing fundamental Gaussian beam model. *J. Opt.*, 2010, no. 12, 015708.

Получено 6.03.2015