

УДК 519.542

Эффективная генерация Ho:YAG лазера с дифракционным качеством пучка*

С. Д. Великанов, А. В. Мухин,
Ю. Н. Фролов

Представлены результаты экспериментальных исследований непрерывной генерации твердотельного гольмиевого (Ho:YAG) лазера, накачиваемого тулиевым волоконным лазером. Дифференциальная эффективность преобразования достигала $\approx 72\%$. Параметр распространения лазерного пучка составил $M^2 < 1,1$.

Введение

Лазерные среды на основе кристалла Ho:YAG представляют большой интерес прежде всего потому, что спектр их излучения попадает в окно прозрачности атмосферы и находится в безопасном для глаз диапазоне длин волн [1]. Применение таких лазеров возможно в системах дальнометрии, при зондировании атмосферы, а также в различных областях медицины [2]. Известно также, что излучение с длиной волны $\lambda = 2$ мкм может быть эффективно преобразовано в средний ИК-диапазон (3–5 мкм) с помощью нелинейно-оптических кристаллов ZnGeP₂ [3].

Эффективность преобразования излучения накачки в Ho:YAG лазере при оптимальных параметрах зеркал резонатора будет определяться соотношением размеров собственной моды резонатора и пучка накачки.

Схема накачки Ho:YAG лазера

Схема накачки Ho:YAG лазера представлена на рис. 1. Источником накачки кристалла Ho:YAG служил непрерывный волоконный лазер, генерирующий непрерывное излучение на длине волны 1908 нм. Для фокусировки излучения лазера накачки использовалась линза L₁ с фокусным расстоянием $f \approx 250$ мм. Ширина пучка накачки по уровню $1/e^2$ энергии составляла около 0,6 мм. Согласно расчетам размер собственной моды в кристалле Ho:YAG составляет около 0,5 мм.

Резонатор Ho:YAG лазера формировался тремя зеркалами: плоским зеркалом M₁ с высоким коэффициентом отражения на длинах волн генерации 2,1 мкм и накачки 1,9 мкм; дихроичным зеркалом M₂ с высоким отражением для пучка генерации на *s*-поляризации (>99,5 %) и высоким пропусканием излучения накачки на *p*-поляризации (>95 %); выходным сферическим полупрозрачным зеркалом M₃. Коэффициент отражения выходного зеркала $r \approx 60\%$. Активный кристалл

* Доклад на VII школе по лазерной физике. Москва, 18–20 июня 2013 г.

Ho:YAG длиной 30 мм и диаметром поперечного сечения 5 мм располагался в коротком плече резонатора между зеркалами M_1 и M_2 . Концентрация ионов Ho^{3+} $1,38 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Для получения импульсно-периодической генерации в длинное плечо резонатора между зеркалами M_2 , M_3 помещался акустооптический модулятор (АОМ) на кристаллическом кварце длиной 45 мм.

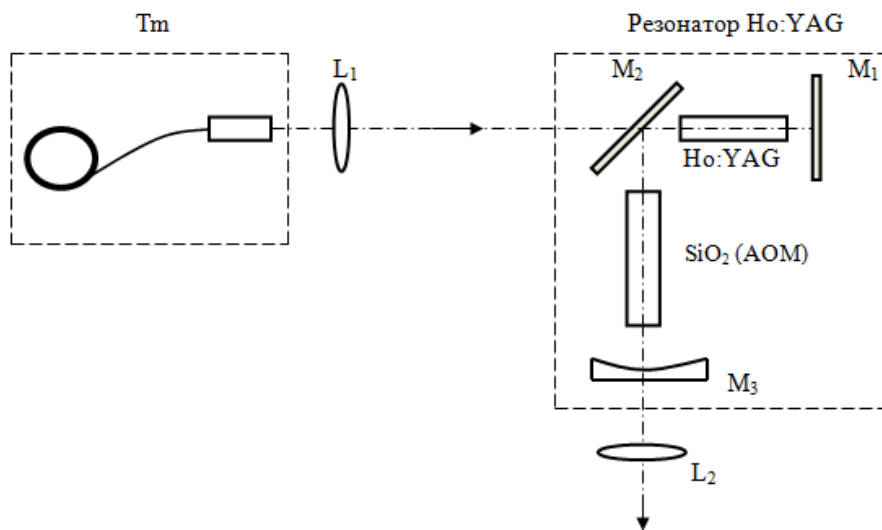


Рис. 1. Схема накачки Ho:YAG лазера: Tm – непрерывный волоконный тулиевый лазер ($\lambda = 1,908 \text{ мкм}$); L_1 – положительная линза с фокусным расстоянием $f \approx 250 \text{ мм}$; M_1 – глухое зеркало резонатора; M_2 – входное зеркало резонатора; M_3 – выходное сферическое зеркало резонатора с кривизной $R = 200 \text{ мм}$; Ho:YAG – активный кристалл; SiO_2 (АОМ) – акустооптический модулятор на кристаллическом кварце; L_2 – положительная линза с фокусным расстоянием $f \approx 100 \text{ мм}$

Экспериментальные исследования

В первой серии экспериментов измерялась мощность генерации лазера в зависимости от мощности накачки и определялась эффективность преобразования. Для получения максимальной эффективности генерации Ho:YAG лазера необходимо обеспечить согласование области накачки с собственной модой резонатора, размер которой определяется радиусом кривизны выходного сферического зеркала (с учетом линзы, наводимой интенсивной накачкой в кристалле Ho:YAG). Такое согласование во многом определяет максимальную эффективность лазеров, работающих по квазитрехуровневой схеме и имеющих сильное поглощение на линии генерации. Следует отметить, что поглощение накачки в кристалле Ho:YAG за два прохода составляло около 98 %.

Во второй серии экспериментов определялся параметр распространения лазерного пучка.

Исследование эффективности преобразования накачки. Измерение выходной мощности Ho:YAG лазера проводилось в непрерывном режиме генерации. Температура кристалла 10°C поддерживалась с помощью элемента Пельтье. Графики зависимости мощности генерации и эффективности преобразования от мощности накачки представлены на рис. 2. Угловая эффективность преобразования составила $\eta \approx 72 \%$.

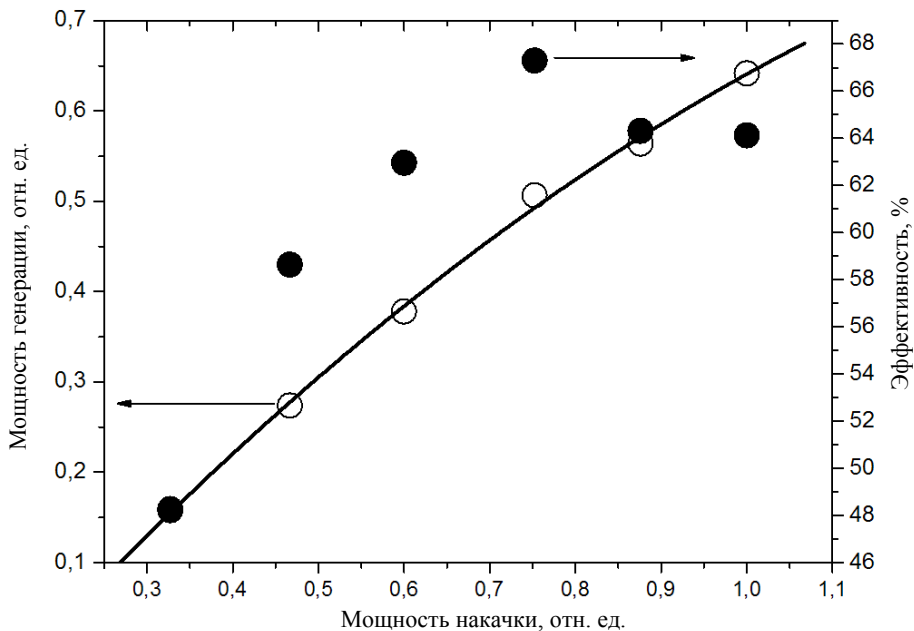


Рис. 2. Зависимость мощности генерации и эффективности преобразования от мощности накачки:
 • – эффективность; о – мощность генерации; линия – аппроксимация экспериментальных данных

Исследование параметра распространения пучка Ho:YAG лазера. Параметр распространения пучка определялся согласно стандарту ISO 11146. Алгоритм определения параметра распространения включает измерение ширины пучка в разных точках относительно перетяжки пучка по уровню $1/e^2$ и аппроксимацию полученных экспериментальных данных гиперболической зависимостью. Удобнее аппроксимировать квадратичную зависимость ширины пучка от расстояния параболической функцией.

Измерение ширины пучка выполнялось с помощью метода ножа Фуко. В данном методе мощность лазерного излучения измерялась в зависимости от положения режущего края ножа (рис. 3). Для фокусировки излучения и формирования каустики гауссова пучка использовалась линза L_2 с фокусным расстоянием $f \approx 100$ мм. С целью уменьшения случайной погрешности измерения проводились по двухканальной схеме, для чего в схеме было предусмотрено делительное зеркало с коэффициентом отражения $\sim 50\%$.

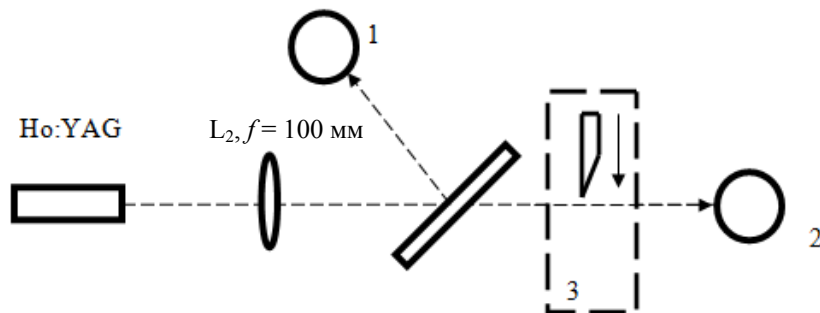


Рис. 3. Схема измерений ширины пучка Ho:YAG лазера: 1, 2 – измерители мощности; 3 – нож с устройством перемещения

Зависимость нормированной мощности от координаты ножа, измеренная в точке $z = 155$ мм от фокусирующей линзы, представлена на рис. 4.

Для определения ширины пучка полученная зависимость аппроксимировалась аналитической функцией на основе сигмоиды [4], а затем дифференцированием определялась ширина пучка.

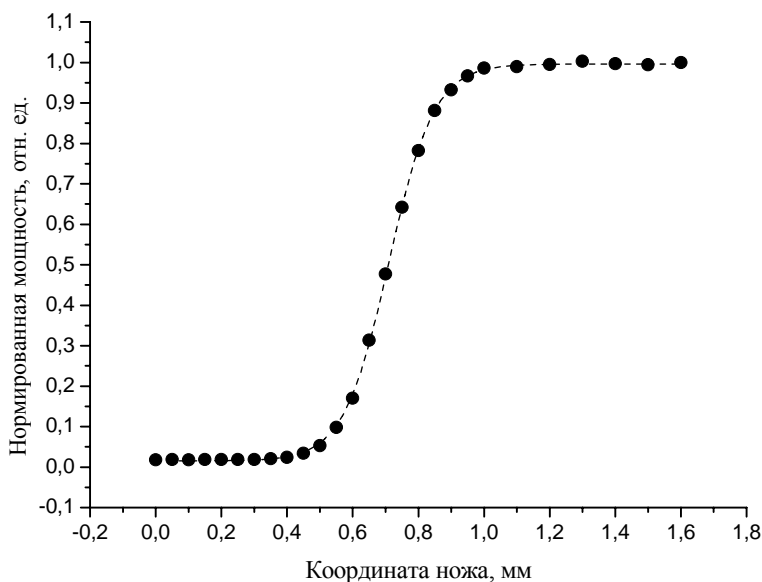


Рис. 4. Зависимость нормированной мощности от координаты движущегося ножа:
 • – эксперимент; - - - – аппроксимация сигмоидой

Необходимо отметить, что зависимость нормированной мощности от координаты ножа для гауссова пучка определяется через функцию ошибок и представляет собой плотность распределения. Профиль интенсивности гауссова пучка определяется через функцию нормального распределения со стандартным отклонением $\sigma = \omega/2$.

Полуширина пучка на расстоянии $z = 155$ мм от линзы составила $\omega \approx 0,229$ мм; аналогично измерялась и в других положениях до и после перетяжки пучка. Зависимость полуширины пучка от расстояния определялась по формуле [5]

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda}{\pi \omega_0^2} \right) (z - z_0)^2}, \quad (1)$$

где λ – длина волны света; M^2 – параметр распространения; z_0 – положение перетяжки; ω_0 – перетяжка пучка.

Квадрат полуширины пучка как функция расстояния от линзы и его аппроксимация параболической функцией представлены на рис. 5.

Из сопоставления параболической функции, полученной из аппроксимации, с функцией зависимости ширины гауссова пучка от расстояния (1) были найдены параметры лазерного пучка: перетяжка пучка $\omega_0 \approx 0,223$ мм; положение перетяжки пучка $z_0 \approx 176$ мм; параметр распространения $M^2 < 1,1$.

Все измерения проводились при максимальной выходной мощности лазера.

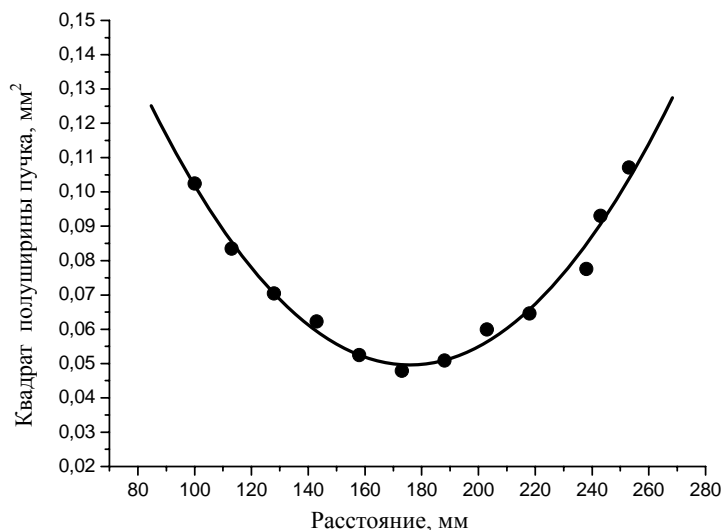


Рис. 5. Зависимость квадрата полуширины пучка от расстояния от линзы:
 • – эксперимент; — – аппроксимация параболой

Выводы

Продемонстрирована эффективная генерация твердотельного гольмиевого лазера в непрерывном режиме. Определена дифференциальная эффективность преобразования и параметр распространения пучка Ho:YAG лазера.

Показано, что при согласовании области накачки с собственной модой резонатора дифференциальная эффективность преобразования достигает $\eta \approx 72\%$. Параметр распространения пучка на максимальной мощности генерации $M^2 < 1,1$.

Список литературы

1. Henderson S. W., Hale C. P., Magee J. R., Kavaya M. J., Huffaker A. V. Eye-safe coherent laser radar system at 2.1 using Tm, Ho:YAG lasers // Opt. Lett. 1991. Vol. 16, N 10. P. 773–775.
2. Грачев С. В. Гольмиевый лазер в медицине. – М.: Триада-Х, 2003.
3. Lippert E., Nicolas S., Arisholm G., Stenersen K., Rustad D. Mid infrared source with high power and beam quality // Appl. Opt. 2006. Vol. 45, N 16. P. 3839–3845.
4. Abramowitz M., Stegun I. A. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables. – Dover, 1965.
5. Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich. Fundamentals of Photonics. 2nd ed. – John Wiley & Sons Inc., 2007.

Efficient Generation of Ho:YAG Laser with Diffractive Beam Quality

S. D. Velikanov, A. V. Mukhin, Yu. N. Frolov

In this work results of experimental investigation of continuous-wave generation of solid-state holmium laser pumped by a thulium fiber laser are presented. Differential efficiency of conversion is reached $\eta \approx 72$ %. The beam propagation factor was measured to be $M^2 < 1,1$.