

УДК 621.3.038.825.2

НЕПРЕРЫВНЫЙ Yb:YAG ЛАЗЕР ДЛЯ ПОРТАТИВНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Ивашко А.М.¹, Кисель В.Э.², Ясюкевич А.С.², Кулешов Н.В.²

¹ОАО «Пеленг», г. Минск, Республика Беларусь,

²НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь,
e-mail: VEKisel@bntu.by

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования генерационных характеристик лазера с продольной непрерывной диодной накачкой на кристалле Yb:Y₃Al₅O₁₂ (YAG) для портативных измерительных систем, работающих в полевых условиях. Проведена оптимизация параметров элементной базы лазера с точки зрения его работы в диапазоне температур от -40 °С до +65 °С без применения принудительной термостабилизации системы. При использовании в качестве активного элемента кристалла Yb(10 ат.%): YAG длиной 3 мм получена выходная мощность излучения более 2 Вт в исследованном температурном диапазоне.

Ключевые слова: лазер, иттербий, продольная диодная накачка, температурный диапазон.

Введение

Разработка и изготовление лазеров, работающих в режиме непрерывной генерации с выходной мощностью в несколько ватт в спектральной области около 1 мкм, является тривиальной задачей, если лазерная система работает в условиях незначительного колебания температур. Однако, при создании лазерной системы, эксплуатирующейся в условиях широкого разброса температур окружающей среды (до 100 °С), возникает ряд проблем как с работоспособностью системы, так и со стабильностью ее характеристик. Основным способом решения данной проблемы является принудительная термостабилизация всего объема лазерной системы либо отдельных, наиболее ответственных, компонентов, таких как активная среда и/или источник накачки. Соответственно, возрастают сложность системы, ее энергопотребление, а также габаритные размеры, масса и время выхода системы на рабочий режим, что в некоторых случаях является недопустимым.

Наиболее распространенными активными средами для лазеров спектрального диапазона около 1 мкм являются Nd³⁺-содержащие материалы. Получение лазерной генерации в данных средах происходит по четырехуровневой схеме, и, как следствие, они характеризуются низкими порогами генерации и достаточно вы-

сокой эффективностью [1, 2]. Однако при использовании селективных источников накачки (лазерных диодов) данные материалы имеют существенный недостаток, ограничивающий возможность их применения, – это узкие полосы поглощения ионов Nd³⁺ [1, 2]. Так, в кристалле Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂ (YAG) полоса поглощения с максимумом в области 808 нм (переход ⁴I_{9/2} → ⁴F_{5/2}+²H_{9/2}) имеет полуширину всего 2,5 нм [1]. Спектр излучения лазерных диодов достаточно узкий (полуширина 2–5 нм) и его положение имеет температурную зависимость с коэффициентом 0,25–0,35 нм/°С, что приводит к сильной деградации выходных характеристик лазера при изменении температуры источника накачки на несколько градусов [3–7].

Альтернативой Nd³⁺-содержащим средам для получения генерации в области около 1 мкм являются материалы, легированные ионами Yb³⁺. Ионы Yb³⁺ (электронная конфигурация 4f¹³) обладают одним возбужденным состоянием ²F_{5/2} с энергией порядка 10⁴ см⁻¹, что хорошо подходит для использования в качестве источников накачки коммерчески доступных лазерных диодов на основе InGaAs, излучающих в области 915–980 нм. Структура уровней ионов Yb³⁺ исключает поглощение из возбужденного состояния ²F_{5/2}, поскольку уровни ближайшей электронной конфигурации лежат в области выше 10⁵ см⁻¹. Более сильное

электрон-фононное взаимодействие по сравнению с другими редкоземельными ионами приводит к значительному однородному уширению линий в спектрах поглощения и люминесценции.

Основным недостатком Yb^{3+} -лазеров является работа по квазитрехуровневой схеме, что приводит к более высоким порогам генерации по сравнению с Nd^{3+} -лазерами. Однако этот недостаток становится незначительным при использовании источников накачки, обладающих высокой яркостью излучения, например, лазерных диодов.

В данной работе предложен метод создания лазера для спектральной области около 1 мкм с продольной непрерывной диодной накачкой, работающего в широком температурном диапазоне без принудительной термостабилизации. В качестве активного элемента выбран кристалл $\text{Yb}(10 \text{ ат.}\%):\text{YAG}$.

Проведено математическое моделирование и экспериментальное исследование работы $\text{Yb}:\text{YAG}$ лазера в температурном диапазоне от -40°C до $+65^\circ\text{C}$.

Лазер предназначен для применения в портативных измерительных системах, работающих в полевых условиях.

Теоретическая часть

В качестве активной среды лазера использовался кристалл иттрий-алюминиевого граната, активированный трехвалентными ионами иттербия Yb^{3+} . Активные среды на основе ионов Yb^{3+} обладают сравнительно небольшим квантовым дефектом, что позволяет создавать лазеры с высокой средней мощностью и высоким качеством светового пучка при достаточно высоких мощностях накачки [8–10]. Лазерные материалы, легированные ионами Yb^{3+} , являются квазитрехуровневыми активными средами. В таких лазерных материалах термическое заселение подуровней как верхнего, так и нижнего лазерных уровней (мультиплетов) приводит к тому, что с излучением накачки и генерации взаимодействуют оба лазерных уровня. Эта особенность требует корректного учета при описании работы лазера.

Работа лазера на кристалле $\text{Yb}:\text{YAG}$ при непрерывной диодной накачке анализировалась в рамках системы балансных уравнений для квазитрехуровневой среды:

$$\frac{d\Phi_l}{dt} = \frac{c\mu}{n}(k_l - k_L)\Phi_l; \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \Phi_p k_p - \Phi_l k_l - \frac{N_2}{\tau}; \quad (2)$$

$$k_l = \sigma_{em}^l N_2 - \sigma_{abs}^l N_1; \quad (3)$$

$$k_p = \sigma_{abs}^p N_2 - \sigma_{em}^p N_1; \quad (4)$$

$$N = N_1 + N_2; \quad (5)$$

Здесь величины, относящиеся к излучению генерации и накачки, будем обозначать индексами l и p , соответственно; $\Phi_x = I_x/(h\nu_x)$ – плотности потока фотонов на частоте генерации ($x = l$) и накачки ($x = p$) в активном элементе; c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления активного элемента; σ_{em}^x – сечение стимулированного испускания на длине волны генерации ($x = l$) и накачки ($x = p$), аналогично и для сечения поглощения σ_{abs}^x , N_2 и N_1 – населенности верхнего и нижнего мультиплетов; N – концентрация активных центров, μ – коэффициент заполнения резонатора; k_L – коэффициент потерь.

Мощность на выходе лазера P_{out} рассчитывалась по формуле:

$$P_{out} = \frac{V_l}{V_p} \frac{k_{act}}{k_L} \frac{\lambda_p}{\lambda_l} (1 - \exp(-k_p I_a)) (P_{inc} - P_{inc}^{th}), \quad (6)$$

где V_p – объем, который занимает излучение накачки в активном элементе; V_l – объем пучка генерируемого излучения в активном элементе; P_{inc} – мощность излучения накачки на входе в активный элемент; P_{inc}^{th} – пороговая мощность излучения накачки на входе в активный элемент. Время жизни иона Yb^{3+} на верхнем лазерном уровне, сечения поглощения и стимулированного испускания взяты из работ [11, 12].

Концентрация ионов Yb^{3+} в активной среде составляла 10 ат.%. Моделирование проводилось для постоянного значения падающей мощности накачки – 6 Вт.

На рисунке 1 приведены результаты численного моделирования работы лазера для значений пропускания выходного зеркала на длине волны генерации 3 %, 5 %, 10 % и 15 %.

Результат моделирования представлен в виде зависимости выходной мощности лазера от дли-

ны волны накачки (λ) и длины активного элемента (l_a). Диапазон длин волн накачки определялся исходя из использования лазерного диода с но-

минальной длиной волны 940 нм и температурного сдвига его длины волны излучения в рабочем температурном диапазоне лазера.

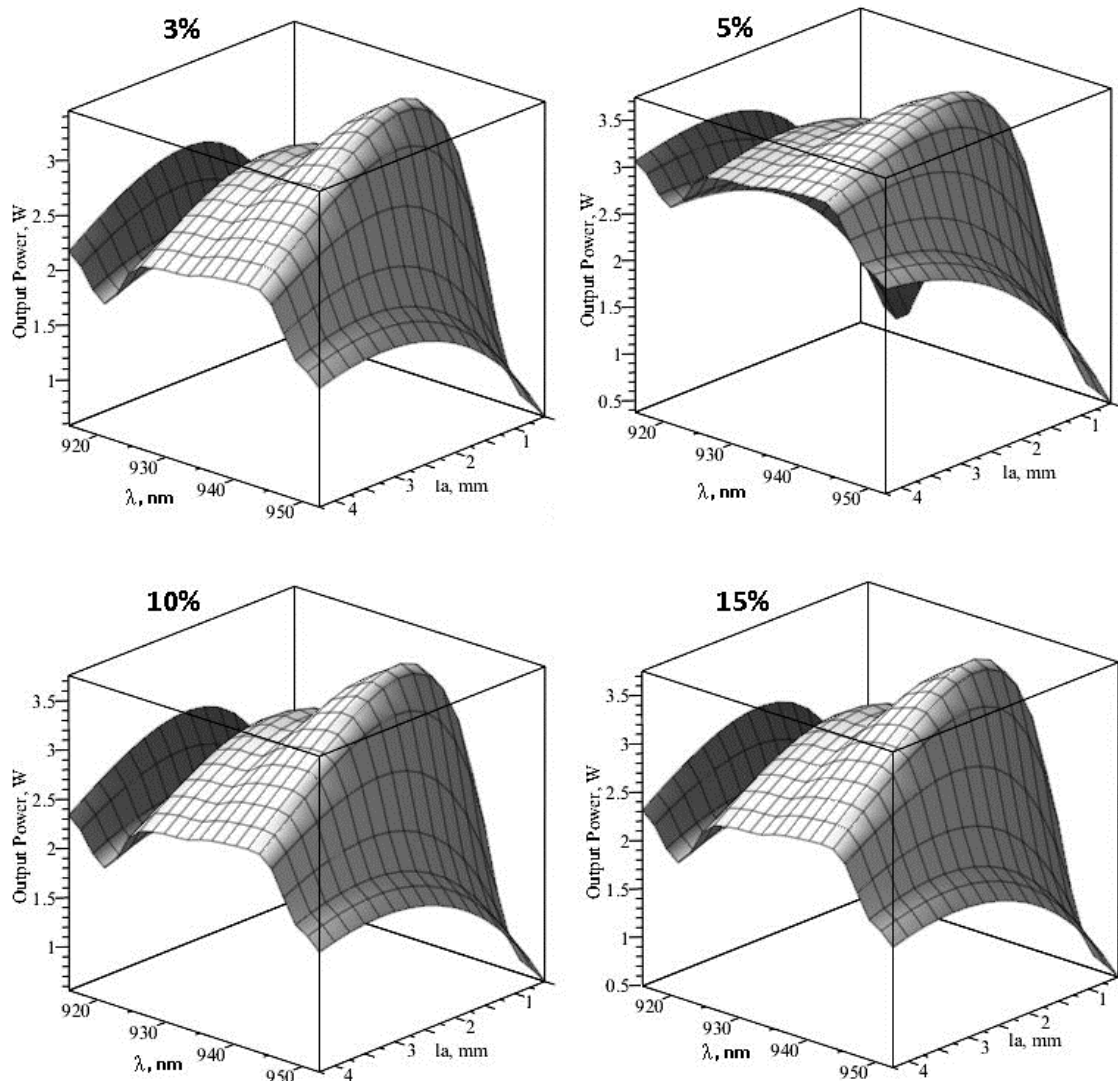


Рисунок 1 – Теоретическая зависимость мощности генерируемого излучения от длины волны накачки и длины активного элемента при различных коэффициентах пропускания выходного зеркала

Для всех выходных зеркал характер зависимости при фиксированном значении длины активного элемента качественно схож со спектром поглощения ионов Yb^{3+} в алюмоиттриевом гранате (на рисунке 2 для примера приведены спектр поглощения кристалла Yb (10 ат.%) :YAG и расчетная зависимость выходной мощности лазера с выходным зеркалом 5 % и длиной активного элемента 2,5 мм).

Выходная мощность лазера для зеркал с коэффициентами пропускания 3 %, 10 % и 15 % характеризуется более выраженной зависимостью от длины волны излучения накачки по

сравнению с выходной мощностью для зеркала с коэффициентом пропускания 5 %. И если в максимуме поглощения иона Yb^{3+} вблизи 940 нм для всех четырех зеркал максимальная выходная мощность приблизительно одинакова и наблюдается для схожих длин активного элемента, то для минимумов поглощения иона Yb^{3+} разница между зеркалом 5 % и остальными существенная. В минимумах поглощения иона Yb^{3+} для зеркал 3 %, 10 % и 15 % максимум выходной мощности приходится на длину активного элемента около 2,5 мм, в то время как для зеркала 5 % максимальная мощность наблюдается для длины ак-

тивного элемента около 3–4 мм. Но даже для равных длин активного элемента в минимумах поглощения иона Yb^{3+} выходная мощность для зеркала 5 % выше, чем для остальных зеркал.

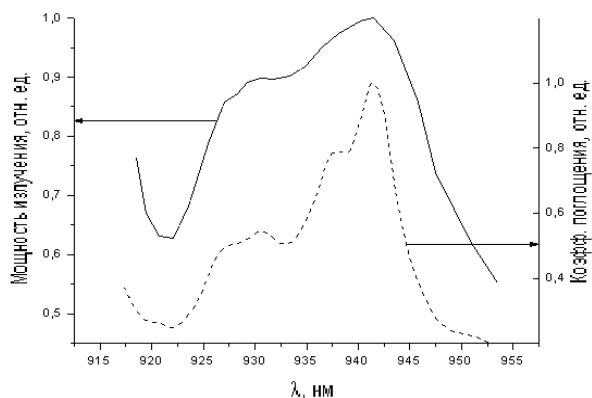


Рисунок 2 – Качественное сравнение спектра поглощения Yb:YAG и теоретической зависимости мощности лазера с выходным зеркалом 5 % и длиной активного элемента 2,5 мм

Экспериментальная часть

Для проведения экспериментальных исследований в климатической камере была собрана установка, схема которой приведена на рисунке 3.

Излучение лазерного диода накачки 1, подключенного к источнику питания 2, с помощью оптической системы 3 фокусировалось в активном элементе 5. В ход лучей накачки была вве-

дена пластина 4 для отведения части излучения через коллимирующую линзу 6 и делитель 7 на систему контроля излучения накачки, состоящую из насадки 8, соединенной через волокно со спектрометром 9 (для определения длины волны накачки), и детектора 10, подключенного к отсчетному устройству 11 (для определения падающей мощности накачки на активный элемент).

Генерируемое лазерное излучение регистрировалось измерительной головкой LM-10 12, подключенной к измерителю мощности LabMax-TOP Coherent 13.

Коэффициенты пропускания компонентов 4, 6 и 7 были известны и учтены при определении падающей на активный элемент мощности накачки. Фотодетектор 10 был предварительно откалиброван по чувствительности для всего исследуемого диапазона температур.

В качестве активного элемента 5 использовался кристалл Yb:YAG с концентрацией активных центров 10 ат. %.

Со стороны источника накачки использовалось зеркало с коэффициентом отражения около 100 % в диапазоне длин волн 1030–1050 нм и коэффициентом пропускания более 98 % для длин волн 910–960 нм.

В качестве источника накачки использовался лазерный диод с номинальной длиной волны 940 нм.

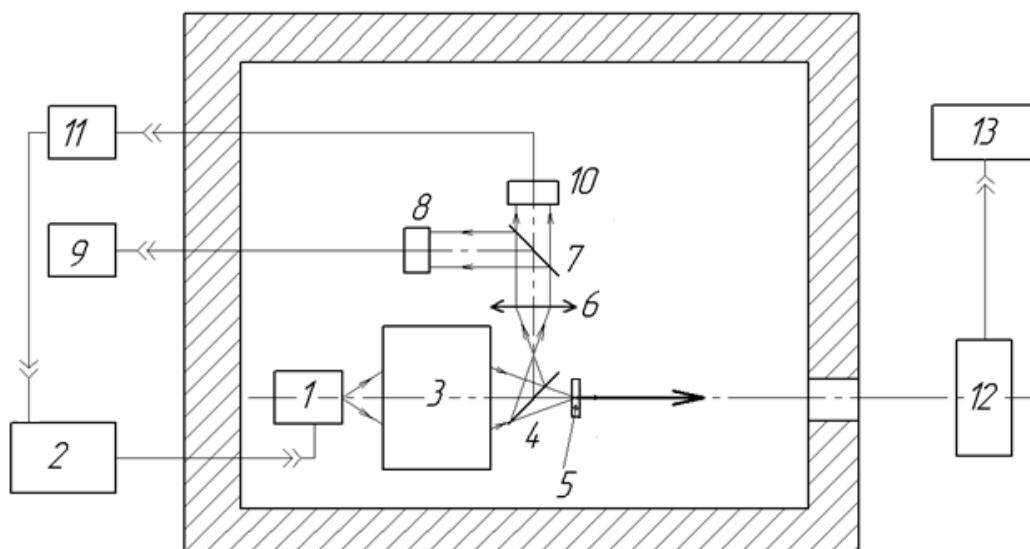


Рисунок 3 – Экспериментальная установка:

- 1 – лазерный диод; 2 – источник питания; 3 – система фокусировки; 4 – пластина; 5 – активный элемент; 6 – линза; 7 – делитель; 8 – насадка; 9 – спектрометр; 10 – детектор; 11 – отсчетное устройство; 12 – измерительная головка; 13 – измеритель мощности

Мощность излучения лазерного диода поддерживалась на одном уровне, обеспечивающем падающую на активный элемент мощность накачки в 6 Вт во всем температурном диапазоне путем автоматической подстройки тока источником питания. Обратную связь в данном случае обеспечивало отсчетное устройство 11, получающее сигнал с фотодетектора 10.

Измерение мощности лазера для каждой температуры проводилось через 5 с после подачи питания на лазерный диод (время переходных процессов для измерительной головки 12 с измерителем мощности 13 составляло приблизительно 4 с). Измерения проводились в температурном диапазоне от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Зависимость выходной мощности Yb:YAG лазера от длины волны излучения накачки (температуры окружающей среды) для активных элементов длиной 2,5 мм с коэффициентами пропускания выходного зеркала 3 %, 5 % и 10 % показана на рисунке 4, где также приведены теоретически полученные результаты для зеркала с коэффициентом пропускания 5 %.

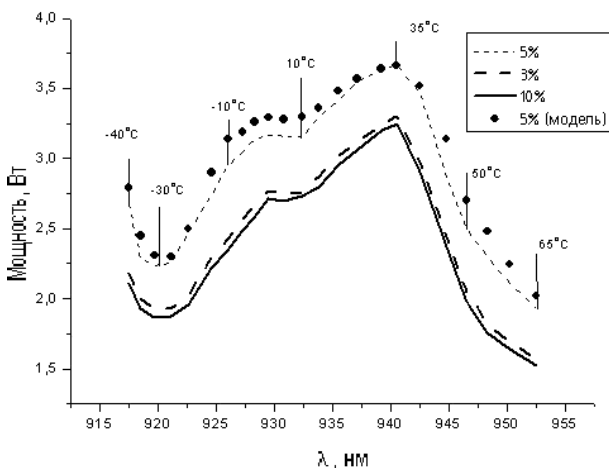


Рисунок 4 – Зависимость выходной мощности лазера от длины волны накачки для активных элементов длиной 2,5 мм с различными коэффициентами пропускания выходного зеркала

Максимальная выходная мощность излучения во всем исследуемом температурном диапазоне получена для выходного зеркала с пропусканием 5 % на длине волны генерации. Максимальное значение выходной мощности составило 3,67 Вт при температуре $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (максимум поглощения кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ вблизи 940 нм), минимальное значение выходной мощности составляло 1,93 Вт при температуре $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, наблюдался локальный

минимум по выходной мощности при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (минимум в спектре поглощения между пиками на 940 нм и 915 нм), в котором для оптимального выходного зеркала пропусканием 5 % значение мощности лазера составляло 2,23 Вт.

Максимальная разница между экспериментальными и расчетными значениями составила 9 %, что свидетельствует о хорошем соответствии результатов численного моделирования и экспериментальных данных.

Далее была исследована зависимость выходной мощности лазера при постоянном значении пропускания выходного зеркала 5 % для активных элементов длиной 2,5 мм, 2,75 мм и 3,0 мм. Эксперименты проводились при положительных температурах, т.е. в зоне минимальной выходной мощности лазера. Результаты экспериментов приведены на рисунке 5.

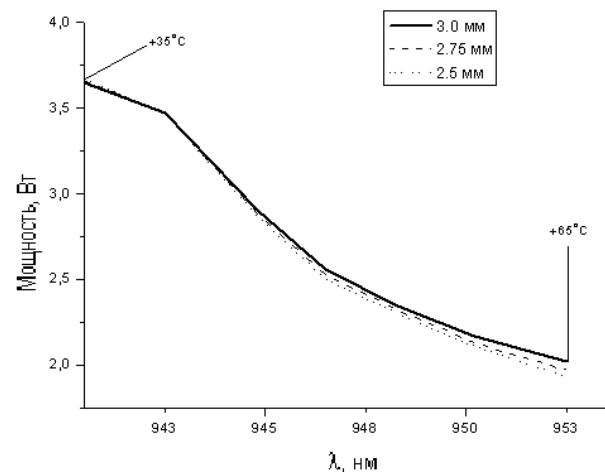


Рисунок 5 – Выходная мощность лазера в зависимости от длины волны накачки для активных элементов разной длины с оптимальным выходным зеркалом

В максимуме поглощения вблизи пика 940 нм разница по выходной мощности для разных активных элементов была невелика, максимальная мощность при этом наблюдалась для элемента длиной 2,5 мм и составляла 3,67 Вт. При максимальной температуре окружающей среды максимальная мощность излучения лазера наблюдалась для кристалла длиной 3 мм и составила 2,02 Вт, что практически на 5 % больше, чем для активного элемента длиной 2,5 мм.

Зависимость потребляемой лазерной системой электрической мощности для получения выходной мощности излучения более 2 Вт в диапазоне температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлена на рисунке 6.

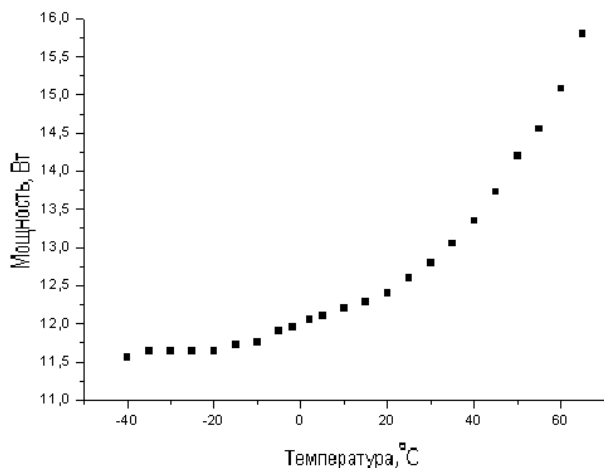


Рисунок 6 – Зависимость потребляемой электрической мощности лазера от температуры

Таким образом, эффективность «от розетки» разработанной лазерной системы была более 12,5 % во всем температурном диапазоне. Для стабилизации выходной мощности излучения на одном уровне во всем температурном диапазоне достаточно использования адаптивной системы питания лазера (изменение тока через лазерный диод накачки в зависимости от температуры окружающей среды).

Заключение

Предложен метод создания надежных и эффективных источников лазерного излучения в спектральном диапазоне около 1 мкм на основе иттербий содержащих материалов, обладающих высокой стабильностью выходных характеристик в широком температурном диапазоне.

Проведено математическое моделирование и экспериментальное исследование работы Yb:YAG лазера в непрерывном режиме генерации с продольной диодной накачкой в диапазоне температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ без принудительной температурной стабилизации с целью оптимизация длины активного элемента и коэффициента пропускания выходного зеркала для получения максимальной выходной мощности при всех исследованных температурах. Максимальная выходная мощность Yb:YAG лазера достигнута при использовании активного элемента длиной 3 мм и выходного зеркала с коэффициентом пропускания 5 %.

Во всем температурном диапазоне мощность лазерного излучения составила более 2 Вт с эффективностью «от розетки» более 12,5 %.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения данного подхода для создания компактных, надежных и эффективных лазерных систем с продольной диодной накачкой для применения в портативных измерительных системах, работающих в полевых условиях.

Список использованных источников

1. *Koechner, W.* Solid State Laser Engineering / W. Koechner. – Sixth Revised and Updated Edition. – New York : Springer, 2006. – 764 p.
2. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом / Г. М. Зверев [и др.]. – М. : Радио и связь, 1985. – 144 с.
3. *Jensen, T.* Spectroscopic characterization and laser performance of diode-laser-pumped Nd:GdVO₄ / T. Jensen [et al.] // Applied Physics B. – 1994. – Vol. 58. – Pp. 373–379.
4. *Aull, Brian F.*, Vibronic interactions in Nd:YAG resulting in nonreciprocity of absorption and stimulated emission cross sections / Brian F. Aull, Hans P. Jenssen // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1982. – Vol. 18. – Pp. 925–930.
5. *Streifer, W.* Advances in diode laser pumps / W. Streifer [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1988. – Volume 24. – Pp. 883–894.
6. *Fan, T.Y.* Diode laser-pumped solid-state lasers / T.Y. Fan, R.L. Byer // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1988. – Volume 24. – Pp. 895–912.
7. *Reinberg, A.R.* GaAs:Si LED pumped Yb-doped YAG laser / A.R. Reinberg [et al.] // Applied Physics Letters. – 1971. – Volume 19. – Pp. 11–13.
8. High efficient 12W diode-pumped actively Q-switched Yb:KGd(WO₄)₂ laser / V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, N.V. Kuleshov, A.A.Pavlyuk // Optics Letters. – 2014. – Volume 39. – pp. 3038–3041.
9. Effect of ytterbium concentration on cw Yb:YAG microchip laser performance at ambient temperature – Part I: Experiments. / Jun Dong, A. Shirakawa, K.-I. Ueda, A.A. Kaminskii // Applied Physics B. – 2007. – Volume 89. – pp. 359–365.
10. Effect of ytterbium concentration on cw Yb:YAG microchip laser performance at ambient temperature – Part II: Theoretical modeling. / Jun Dong, A. Shirakawa, K.-I. Ueda, A.A. Kaminskii // Applied Physics B. – 2007. – Volume 89. – pp. 367–376.
11. Room-temperature 50-mJ/pulse side-diode-pumped Yb:YAG laser / Sumida D. S., Fan T. Y. // Optics Letters. – 1995. – Volume 20. – pp. 2384–2386.
12. Laser demonstration of Yb₃Al₅O₁₂ (YbAG) and materials properties of highly doped Yb:YAG / Patel F. D., Honea E. C., Speth J., Payne S. A., Hutcheson R., Equall R. // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2001. – Volume 37. – pp. 135–144.

CW Yb:YAG LASER FOR PORTABLE MEASURING SYSTEMS

*Ivashko A.M.¹, Kisel V.E.², Yasukevich A.S.², Kuleshov N.V.²*¹JSC «Peleng», Minsk, Belarus²Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus
e-mail: VEKisel@bntu.by

Abstract. The theoretical and experimental results of longitudinally continuous-wave diode-pumped Yb:Y3Al5O12 (YAG) laser performance for compact field-condition measuring systems were demonstrated. Optimization of laser setup in terms of operation condition in the range of -40 °C – +65 °C without active thermal stabilization was carried out. Using Yb (10 at.%)YAG crystal with the length of 3 mm the maximal output power more than 2 W was obtained in the whole of temperature range.

Keywords: laser, ytterbium, longitudinally diode pumping, wide temperature range.

References

1. Koechner W., *Solid State Laser Engineering*. New York, Springer, 2006. 764 p.
2. Zverev G.M., Holiaev Y.D., Shalaev E.A., Shokin A.A. *Lasery na alymoitrievom granate s neodimom* [Lasers on yttrium aluminum garnet with neodymium]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1985. 144p.
3. Jensen T., Ostroumov V.G., Meyn J. -P., Huber G, Zagumennyi A.I., Shcherbakov I.A. Spectroscopic characterization and laser performance of diode-laser-pumped Nd:GdVO₄. *Applied Physics B*, 1994, Vol. 58, pp. 373-379.
4. Aull B.F., Jenssen H.P. Vibronic interactions in Nd:YAG resulting in nonreciprocity of absorption and stimulated emission cross sections. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, Vol. 18, pp. 925–930.
5. Streifer W., Scifres D.R., Harnagel G.L., Welch D.F., Berger J, Sakamoto M. Advances in diode laser pumps. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, Vol. 24, pp. 883–894.
6. Fan T.Y., Byer R.L. Diode laser-pumped solid-state lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, Vol. 24, pp. 895–912.
7. Reinberg A.R., Riseberg L.A., Brown R.M., Wacker R.W., Holton W. C. GaAs:Si LED pumped Yb-doped YAG laser. *Applied Physics Letters*, 1971, Vol. 19, pp. 11–13.
8. Kisel V.E., Rudenkov A.S., Kuleshov N.V., Pavlyuk A.A. High efficient 12W diode-pumped actively Q-switched Yb:KGd(WO₄)₂ laser. *Optics Letters*, 2014, Vol. 39, pp. 3038–3041.
9. Dong J., Shirakawa A., Ueda K.-I., Kaminskii A.A. Effect of ytterbium concentration on cw Yb:YAG microchip laser performance at ambient temperature – Part I: Experiments. *Applied Physics B*, 2007, Vol. 89, pp. 359–365.
10. Dong J., Shirakawa A., Ueda K.-I., Kaminskii A.A. Effect of ytterbium concentration on cw Yb:YAG microchip laser performance at ambient temperature – Part II: Theoretical modeling *Applied Physics B*, 2007, Vol. 89, pp. 367–376.
11. Sumida D.S., Fan T.Y. Room-temperature 50-mJ/pulse side-diode-pumped Yb:YAG laser. *Optics Letters*, 1995, Vol. 20, pp. 2384–2386.
12. Patel F.D., Honea E.C., Speth J., Payne S.A., Hutcheson R., Equall R. Laser demonstration of Yb₃Al₅O₁₂ (YbAG) and materials properties of highly doped Yb:YAG. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, Vol. 37, pp. 135–144.

Поступила в редакцию 15.10.2014.