

УДК 535 621.375

Моделирование лазерного излучателя на основе Nd:YAG с пассивным охлаждением для измерения расстояний

Орехов К.А.

ОАО «Пеленг»,
ул. Макаенка, 23, 220023, г. Минск, Беларусь

Поступила 28.12.2015
Принята к печати 28.03.2016

Существующие на данный момент лазерные излучатели для измерения расстояний, работающие без охлаждения, обладают рядом недостатков: низкая энергия выходного излучения, что ограничивает дальность измерения; высокая расходимость на выходе резонатора, что требует установки массивной формирующей оптики и значительно увеличивает габаритные размеры; нестабильность параметров излучения при длительной работе из-за нагрева лазерного кристалла. В данной работе рассматривается теоретическая модель лазерного излучателя для передающего блока лазерного дальномера на основе цилиндрического активного элемента Nd:YAG с поперечной диодной накачкой, позволяющей решить вышеуказанные проблемы. Моделирование системы проведено методами матричной оптики и на основе балансных уравнений. В основу излучателя положена плоско-вогнутая схема резонатора с внутренней рассеивающей линзой, предназначенной для согласования размера моды TEM_{00} с размерами активной среды и перестройки резонатора на границу устойчивости, что позволяет получить расходимость на выходе резонатора на уровне дифракционной для лазерного стержня диаметром до 5 мм при длине резонатора 300 мм. Перестройка резонатора и согласование размера моды осуществляется продольной подвижкой линзы относительно «глухого» зеркала. Рассмотрены модели односторонней, двусторонней и трехсторонней схем накачки, проведен их сравнительный анализ с точки зрения равномерности распределения поглощенной энергии внутри лазерного кристалла, а также эффективности. Разработана модель трехсторонней накачки с системой клиновидных отражателей с золотым покрытием, обеспечивающая эффективность накачки на уровне 54 % при равномерном распределении энергии накачки по сечению активного элемента. На основе моделирования в среде ANSYS предложена схема реализации терморегулирования активного элемента при работе в вакууме введением теплопроводящего клея между боковой гранью активного элемента и корпусом квантрона, что позволяет при цикле в 8 мин снизить нагрев активного элемента на 35 °С. Энергия излучения в импульсе при накачке 1,2 Дж составляет около 0,3 Дж при длительности импульса 4 нс и частоте 2 Гц.

Ключевые слова: перестраиваемый резонатор, поперечная диодная накачка, пассивное охлаждение активного элемента.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-50-57

Адрес для переписки:
Орехов К.А.
ОАО «Пеленг»,
ул. Макаенка, 23, 220023, г. Минск, Беларусь
e-mail: ice987@mail.ru

Address for correspondence:
Orehov K.A.
Peleng JSC,
Makayonka str., 23, 220023, Minsk, Belarus
e-mail: ice987@mail.ru

Для цитирования:
Орехов К.А.
Моделирование лазерного излучателя на основе Nd:YAG с пассивным охлаждением для измерения расстояний. Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 1. – С. 50–57
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-50-57

For citation:
Orehov K.A.
[Simulation of laser transmitter based on Nd:YAG with passive cooling for rangefinding].
Pribory i metody izmerenj [Devices and Methods of Measurements]. 2016, vol. 7, no. 1, pp. 50–57 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-50-57

Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется совершенствованию лазерных дальнометрических систем различного назначения. Основным компонентом таких систем является источник зондирующего импульса, который во многом определяет как точность измерения, так и возможность использования системы в определенных внешних условиях. В качестве подобного излучателя в работе [1] был выбран Nd:YAG лазер с диодной накачкой и энергией импульса 40 мДж. Частота следования импульсов составляла 10 Гц. Выходной лазерный импульс имел длительность 7,5 нс. Накачка производилась матрицей GaAlAs лазерных диодов с длиной волны излучения 808 нм. КПД данного излучателя составлял 3 %. Ожидаемая наработка – 600 млн лазерных импульсов. Расходимость на выходе из лазера контролировалась телескопом, с помощью которого достигалась расходимость 0,3 мрад в сечении пучка, содержащем 90 % энергии импульса. В работе [2] в качестве источника зондирующего излучения используется Nd:YAG лазер с выходной энергией импульса 5 мДж и длительностью 15 нс. Накачка производится матрицей из 20 GaAlAs лазерных диодов с длиной волны излучения 808 нм. Резонатор был образован двумя оборачивающими призмами БР-180 с поляризационным выводом излучения. Расходимость в 0,3 мрад достигалась с помощью телескопа, построенного по схеме Галилея с кратностью 9,3х. В работе [3] в качестве излучателя использовался лазер на кристалле Nd:YAG с модуляцией добротности и диодной накачкой с длительностью импульса 10 нс и энергией 15 мДж при частоте их следования 242 Гц. Активный элемент формы *slab* помещен в неустойчивый резонатор длиной 36 см с выходным зеркалом, имеющим гауссов профиль отражения.



Рисунок 1 – Схема резонатора: 1 – «глухое» зеркало; 2 – четвертьволновая пластинка; 3 – электрооптический затвор; 4 – рассеивающая линза; 5 – линейки диодных лазеров; 6 – активный элемент; 7 – выходное зеркало

Figure 1 – Cavity scheme: 1 – rear mirror; 2 – quarter-wave plate; 3 – electrooptical q-switch; 4 – plano-concave lens; 5 – lines of laser diodes; 6 – laser rod; 7 – output coupler

Лазер охлаждался кондуктивно при температуре окружающей среды 25 °С. Излучатель производил импульс с расходимостью 1 мрад по уровню $1/e^2$, $M^2 = 1,2$. Оптическая эффективность составляла 14 %. Однако недостатком вышеуказанных схем является низкая энергия лазерного излучения, что ограничивает дальность измерения, а также высокая расходимость на выходе резонатора, что требует применения массивного формирующего телескопа и, соответственно, значительно увеличивает общие габариты системы. Целью данной работы было создание модели высокоэффективного лазерного излучателя высокой мощности с расходимостью на уровне дифракционной, способного работать в условиях вакуума без применения принудительного охлаждения.

Описание и расчет модели лазерного излучателя

Выбор схемы излучателя обусловлен рядом налагаемых ограничений: дальность измерения не менее 200 км, длительность зондирующего импульса не более 10 нс, отсутствие принудительного жидкостного охлаждения активного элемента и охлаждения за счет конвекции, ресурс работы – несколько лет, габаритные ограничения. Энергия импульса излучения, необходимая для последующей регистрации отраженного сигнала с учетом потерь в атмосфере, должна составлять не менее 0,15 Дж.

Подходящим для реализации схемы является кристалл Nd:YAG, обладающий высокой теплопроводностью 13 Вт/(м·К), а также длиной волны излучения, попадающей в окно прозрачности атмосферы.

Исходя из рассмотрения всех выше перечисленных факторов, для разработки выбрана схема, приведенная на рисунке 1.

Для расчета параметров пучка в резонаторе применена упрощенная модель (рисунок 2).

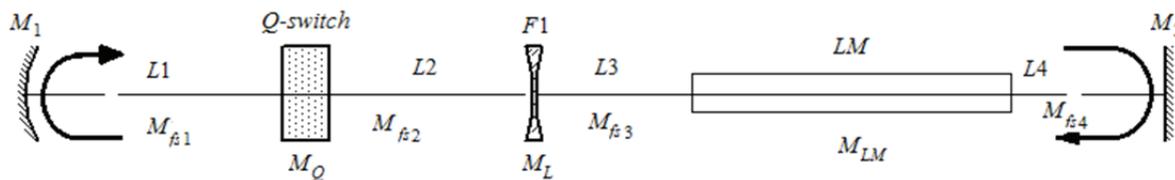


Рисунок 2 – Модель для расчета параметров пучка: M_1 – «глухое» зеркало; Q -switch – электрооптический затвор; $F1$ – вогнутая линза; LM – активный элемент; M_2 – выходное зеркало; $L1, L2, L3, L4$ – расстояния между компонентами; $M_{fs1}, M_Q, M_{fs2}, M_L, M_{fs3}, M_{LM}, M_{fs4}$ – матрицы, описывающие соответствующие компоненты

Figure 2 – Model for beam calculation: M_1 – rear mirror, Q -switch – electrooptical Q-switch; $F1$ – concave lens; LM – laser medium; M_2 – output coupler; $L1, L2, L3, L4$ – distances between the optical components; $M_{fs1}, M_Q, M_{fs2}, M_L, M_{fs3}, M_{LM}, M_{fs4}$ – matrixes describing the respective components

Модель описывается матрицей [4]:

$$M = M_{fs4} M_{LM} M_{fs3} M_L M_{fs2} M_Q M_{fs1} M_1 M_{fs1} \times \\ \times M_Q M_{fs2} M_L M_{fs3} M_{LM} M_{fs4} M_2,$$

где $M_{fs} = \begin{pmatrix} 1 & L_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ – матрицы свободного про-

странства между оптическими элементами (толщина четвертьволновой пластинки учитывается в M_{fs1});

$$M_Q = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L_Q}{n_Q} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ – матрица электрооптического затвора;}$$

$$M_L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \text{ – матрица линзы;}$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{pmatrix}, M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{pmatrix} \text{ – матрицы зеркал;}$$

$$M_{LM} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ – матрица активного элемента}$$

(в данной ситуации допускается рассмотрение активного элемента как участка среды с показателем преломления n , так как на частоте генерации менее 5 Гц влияние термлинзы можно не учитывать).

При анализе схемы матричным методом был произведен расчет зависимостей размера перетяжки ω моды TEM_{00} в зависимости от разностей фокусного расстояния линзы f и радиуса кривизны глухого зеркала R (рисунок 3). Кроме того, разность $(R-f)$ прямо пропорциональна перемещению внутрирезонаторной линзы вдоль оптической оси и, таким образом, определяет фокусное расстояние эквивалентного телескопа, образованного сферическим зеркалом и отрицательной линзой. Перемещение внутрирезонаторной линзы также

позволяет компенсировать неточность изготовления оптических элементов.

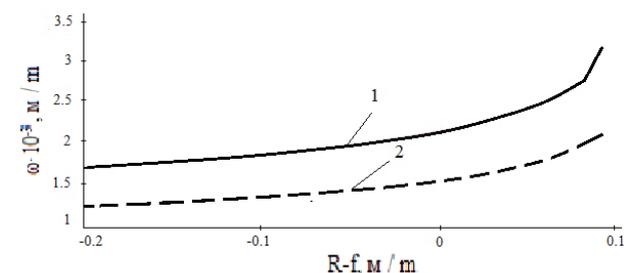


Рисунок 3 – Зависимость радиуса моды внутри резонатора от разности радиуса кривизны «глухого» зеркала и фокусного расстояния внутрирезонаторной линзы: 1 – $R = 10$ м; 2 – $R = 5$ м

Figure 3 – Dependence of mode radius inside the cavity on the difference between the radius of curvature of rear mirror and the focal length of the intracavity lens: 1 – $R = 10$ m; 2 – $R = 5$ m

В качестве «глухого» зеркала рассмотрены зеркала с коэффициентом отражения 99,95 %, радиусами $R = 10$ м и $R = 5$ м. Каждому зеркалу подобраны рассеивающие линзы с фокусным расстоянием $f = -10$ м и $f = -5$ м, соответственно. «Глухое» зеркало с рассеивающей линзой образует своеобразную перестраиваемую телескопическую систему, позволяющую согласовать моду резонатора с размерами активного элемента, регулировать расходимость излучения, выделить рабочий участок активного элемента с наиболее равномерной накачкой без введения дополнительных диафрагм.

Следующим шагом стала необходимость обеспечения нужного уровня накачки активного элемента с минимальными потерями на транспортировку и равномерности ее распределения в сечении активного элемента. Ввиду ограниченности габаритов был проведен анализ возможности использования односторонней, двусторонней и трехсторонней схем накачки с использованием отражателей и без них [5, 6]. Соответствующие схемы, а также графики распределения плотно-

сти энергии накачки по сечению активного элемента приведены на рисунке 4.

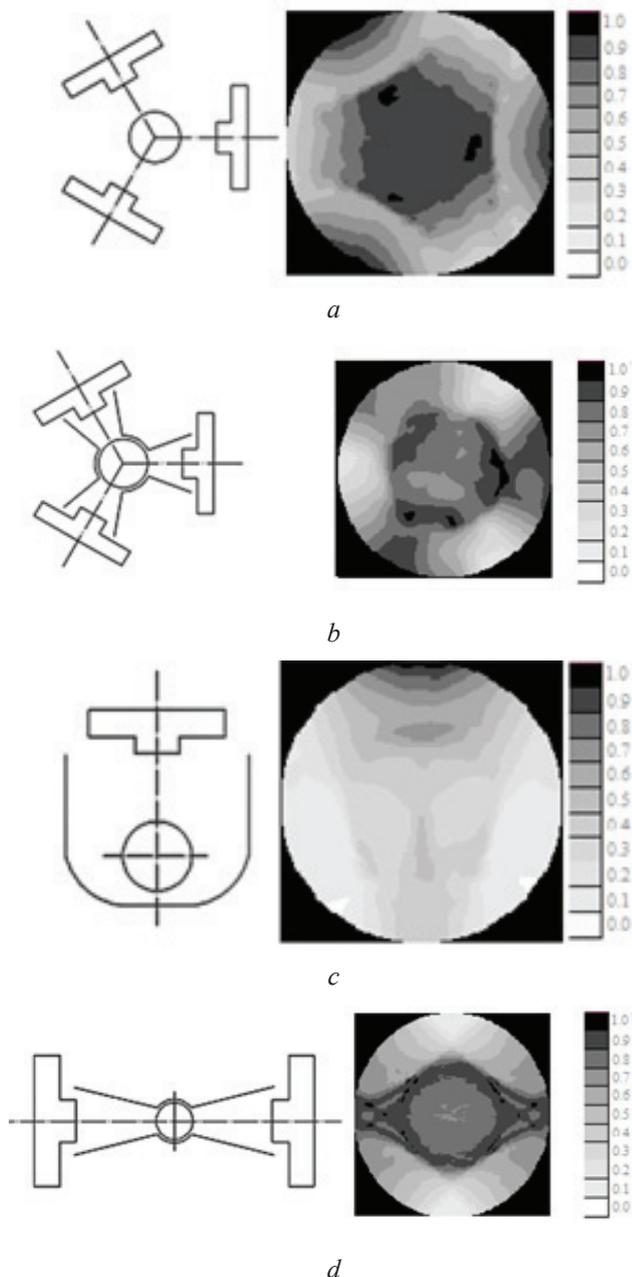


Рисунок 4 – Распределение плотности энергии накачки по сечению активного элемента при использовании типа накачки: *a* – трехсторонняя без отражателя; *b* – трехсторонняя с отражателем; *c* – односторонняя с отражателем; *d* – двухсторонняя с отражателем

Figure 4 – Distribution of pump energy density over the cross section of the laser rod under pump scheme: *a* – from three sides without reflector; *b* – from three sides with reflector; *c* – from one side with reflector; *d* – from two sides with reflector

В схеме без отражателя рассеяние на боковой поверхности активного элемента вносит значи-

мые потери энергии накачки. В случае односторонней и двусторонней накачки наблюдается значительная неоднородность распределения плотности энергии в активном элементе, что в итоге значительно ухудшает качество выходного пучка. Наиболее оптимальной с точки зрения равномерности распределения энергии и эффективности накачки оказалась схема трехсторонней накачки с системой концентраторов, имеющих золотое покрытие. Структура из трех концентраторов объединена цилиндрическими отражающими поверхностями, направляющими рассеянное по поверхностью активного элемента излучение в его центральную часть [7]. При растворе угла отражателя 15° (угол между отражающими поверхностями) нормированный коэффициент потерь при транспортировке в зависимости от угла выхода излучения диода имеет вид, представленный на рисунке 5. Расчет проведен с учетом линейной поляризации излучения накачки.

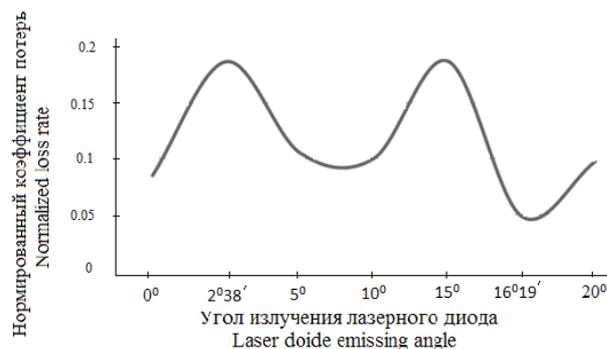


Рисунок 5 – Распределение потерь при транспортировке в отражателе в зависимости от угла выхода излучения линейки лазерных диодов

Figure 5 – Pump energy losses distribution in the reflector depending on radiation field of laser diodes array

Использование других типов покрытий (не золото) вызывает уменьшение КПД при транспортировке излучения накачки к активному элементу: у алюминия в спектре отражения на длине волны накачки наблюдается провал, медь и серебро окисляются, что требует нанесения дополнительного защитного покрытия. Коэффициент отражения защитных покрытий составляет 76–77 % [8]. Использование диэлектрических покрытий на металле в вакууме требует дополнительных исследований ввиду возможного отслоения в процессе длительной эксплуатации.

С учетом потерь энергии накачки при транспортировке (15 %), частичного отражения от боковой поверхности активного элемента, поглоще-

ния в активном элементе на длине волны накачки $1 - e^{-\alpha d}$, квантового дефекта $-\lambda_p/\lambda$ и квантовой эффективности $-0,9$ [9] дифференциальный КПД накачки составляет $\eta_p = 54\%$

Расчет энергетических характеристик для режима модуляции добротности произведен на основании скоростных уравнений [10]:

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta N)}{dt} = W_p (N - \Delta N) - BQ\Delta N - \frac{\Delta N}{\tau} \\ \frac{dQ}{dt} = \left(V_e B \Delta N - \frac{1}{\tau_c} \right) Q \end{cases},$$

где ΔN – инверсия населенности верхнего лазерного уровня;
скорость накачки определяется как:

$$W_p = \frac{P_{abs}}{V_a h \nu_p N};$$

$P_{abs} = P_p \eta_p$ – мощность, поглощенная активным элементом; P_p – мощность накачки, η_p – КПД накачки; V_a – объем активного элемента; V_e – объем моды в активном элементе; ν_p – разница частот верхнего лазерного и основного уровней; N – концентрация ионов Nd^{3+} ; B – скорость вынужденного излучения на один фотон в моде; τ – время жизни верхнего лазерного уровня; Q – плотность фотонов в резонаторе; τ_c – время жизни фотона в резонаторе.

На рисунке 6 приведены расчетные графики зависимости выходной энергии излучателя от энергии накачки при длительности импульса накачки 150 мкс в режиме модуляции добротности при расходимости излучения на уровне дифракционной.

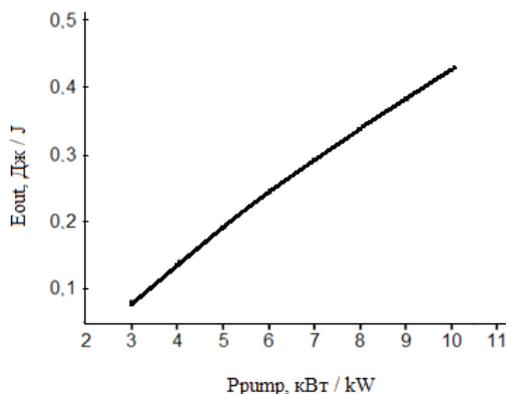


Рисунок 6 – Зависимость выходной энергии излучателя от мощности накачки

Figure 6 – Dependence of the output energy on the pump power

При длительности накачки 150 мкс, ее мощности 8,5 кВт и частоте следования импульсов 2 Гц расчет показал, что мощность, выделяемая в виде теплового излучения, составляет 0,6 Вт. На полном рабочем цикле в 8 мин это приводит к нагреву центральной части активного элемента до 70 °С. При условии контакта поверхности активного элемента с корпусом квантрона лишь через резиновые уплотнительные кольца вблизи торцов активного элемента, возникающая термолинза приводит к срыву генерации. Данная проблема была решена введением теплопроводящего клея между боковой поверхностью активного элемента в его центральной части и корпусом квантрона.

Моделирование теплопереноса в системе ANSYS [11] показало, что при введении теплопроводящего клея нагрев активного элемента за полный рабочий цикл не превышает 15 °С, что решает задачу терморегулирования системы.

Заключение

Разработана модель высокоомощного и эффективного лазерного излучателя с боковой диодной накачкой, характеризующегося расходимостью излучения на уровне дифракционной, и перестраиваемым телескопическим резонатором на границе устойчивости; при энергии накачки 1,2 Дж энергия излучения в импульсе длительностью 4 нс составляет около 0,3 Дж. Разработана модель системы концентраторов, обеспечивающих равномерное распределение энергии накачки внутри активного элемента, с потерями при транспортировке не более 15 %. Предложена схема терморегулирования активного элемента без использования средств принудительного охлаждения.

Сравнительный анализ показывает преимущества полученной модели над другими системами со значительными габаритными ограничениями, где необходимо получение высокой энергии и пространственного качества импульса излучения. Высокая эффективность системы накачки позволяет снизить энергопотребление и увеличить КПД излучателя.

В совокупности высокая энергия и низкая расходимость импульса излучения, метод термостабилизации, полученные в данной модели, позволят значительно увеличить дальность и точность измерения расстояний, увеличить цикл

непрерывной работы лазера без ухудшения характеристик и снизить требования к габаритам формирующих оптических систем.

Список использованных источников

1. *Zuber, M.T.* The Mars Observer Laser Altimeter Investigation / M.T. Zuber // Journal of geophysical research. – 1992. – Vol. 97, no. E5. – P. 7781–7797.

2. *Cole, T.D.* NEAR laser rangefinder: A tool for the mapping and topologic study of asteroid 433 Eros / T.D. Cole // Johns Hopkins apl technical digest. – 1998. – Vol. 19. – P. 142–157.

3. *Coyle, D.B.* NASA Goddard Space Flight Center. Design and performance of the vegetation canopy Lidar (VCL) laser transmitter / D.B. Coyle, R.B. Kay, S.J. Lindauer // Aerospace Conference Proceedings. – 2002. – IEEE, vol. 3. – P. 1457–1464.

4. *Hodgson, N.* Laser Resonators and Beam Propagation, Fundamentals, Advanced Concepts and Applications, Second Edition / N. Hodgson, H. Weber // Springer. – 2005. – 793 p.

5. *Grechin, S.G.* Diode-side-pumped laser heads for solid-state lasers / S.G. Grechin, P.P. Nikolaev // Quantum electron. – 2009. – Vol. 39, no. 1. – P. 1–17.

6. *Jonghoon, Yi.* Diode-pumped Nd:YAG Rod Laser with Single-side Pumping Geometry / Yi Jonghoon, Youngjung Kim and Kangin Lee // Journal of the Korean Physical Society. – 2010. – Vol. 57, no. 2. – P. 355–358.

7. *Jirong, Yu.* Advanced 2-micron Solid State Laser Developments / Yu. Jirong, U.N. Singh, M.J. Kavaya // NASA Langley Research Center, MS 468, Hampton, VA, ESTO Conference, 28–29 June 2005.

8. *Marvin J. Weber.* Handbook of optical materials / Marvin J. Weber // CRC Press LLC. – 2003.

9. *Koechner, W.* Solid-state lasers: A Graduate Text / W. Koechner // Springer. – 2003. – 409 p.

10. *Svelto, O.* Principles of Lasers, Fifth edition / O. Svelto, D.C. Hanna // Springer Science+Business Media, LLC. – 2010. – 620 p.

11. Website of ANSYS, Inc. Available at: <http://www.ansys.com/> (accessed 1.12.2015).

Simulation of laser transmitter based on Nd: YAG with passive cooling for rangefinding

Orehov K.A.

*Peleng JSC,
Makayonka str., 23, 220023, Minsk, Belarus*

Received 28.12.2015

Accepted for publication 28.03.2016

Abstract. Laser emitters used in rangefinders without cooling have several limitations: low energy, high beam divergence at the cavity exit that leads to large output telescope design that significantly increases rangefinder's size, long time beam parameters instability due to laser crystal heating. In the article laser emitter for a transmitting unit of rangefinder based on cylindrical laser medium Nd:YAG with transverse diode pumping abled to solve all the abovementioned problems is considered. Matrix optics and balance equations were used for system modeling. The emitter is based on plano-concave scheme cavity with internal concave lens aimed for matching the size of TEM₀₀ mode with the size of laser medium and cavity tuning to stability threshold which allows to achieve divergence of the output pulse at diffraction level for 5 mm diameter medium and 300 mm cavity length. Cavity reconfiguration and mode size compliance is conducted by the longitudinal movement of lens relative to the rear mirror. Three-, two- and one-sided pump schemes are compared in terms of rod energy absorption uniformity and their effectiveness. The three-sided pump scheme model with a system of gold coated reflectors was designed that provides 54 % efficiency of pump when the pump energy is distributed uniformly along the cross-section of the laser medium. Based on the modeling in ANSYS the scheme of laser medium thermal control in vacuum conditions was suggested that implies introduction heat-conducting glue between the side edge of a laser medium and quantron body that allows to low the active medium heating in the 8 min cycle by 35 °C. Beam pulse energy under pump of 1.2 Joule equals to about 0.3 Joule with the 4 ns pulse time and 2 Hz in frequency.

Keywords: variable cavity, transverse diode pumping, passive cooling of active element.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-50-57

Адрес для переписки:

Орехов К.А.
ОАО «Пеленг»,
ул. Макаенка, 23, 220023, г. Минск, Беларусь
e-mail: ice987@mail.ru

Address for correspondence:

Orehov K.A.
Peleng JSC,
Makayonka str., 23, 220023, Minsk, Belarus
e-mail: ice987@mail.ru

Для цитирования:

Орехов К.А.
Моделирование лазерного излучателя на основе Nd:YAG с пассивным охлаждением для измерения расстояний. Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 1. – С. 50–57
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-50-57

For citation:

Orehov K.A.
[Simulation of laser transmitter based on Nd:YAG with passive cooling for rangefinding].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements]. 2016, vol. 7, no. 1, pp. 50–57 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-50-57

References

1. Zuber M.T. The Mars Observer Laser Altimeter Investigation. *Journal of geophysical research*, 1992, vol. 97, no. E5, pp. 7781–7797.
2. Cole T.D. NEAR laser rangefinder: A tool for the mapping and topologic study of asteroid 433 Eros, *Johns Hopkins apl technical digest*, 1998, vol. 19, pp. 142–157.
3. Coyle D.B., Kay R.B., Lindauer S.J. NASA Goddard Space Flight Center. Design and performance of the vegetation canopy Lidar (VCL) laser transmitter. *Aerospace Conference Proceedings*, 2002. IEEE, vol. 3, pp. 1457–1464.
4. Hodgson N., Weber H. Laser Resonators and Beam Propagation, Fundamentals, Advanced Concepts and Applications, Second Edition, *Springer*, 2005, 793 p.
5. Grechin S.G., Nikolaev P.P. Diode-side-pumped laser heads for solid-state lasers, *Quantum electron*, 2009, vol. 39, no. 1, pp. 1–17.
6. Jonghoon Yi, Youngjung Kim and Kangin Lee. Diode-pumped Nd:YAG Rod Laser with Single-side Pumping Geometry. *Journal of the Korean Physical Society*, 2010, vol. 57, no. 2, pp. 355–358.
7. Jirong Yu., Singh U.N., Kavaya M.J. Advanced 2-micron Solid State Laser Developments, *NASA Langley Research Center, MS 468, Hampton, VA, ESTO Conference*, 28–29 June 2005.
8. Marvin J. Weber. Handbook of optical materials, *CRC Press LLC*, 2003.
9. Walter Koechner. Solid-state lasers: A Graduate Text, *Springer*, 2003, 409 p.
10. Svelto O., Hanna D.C. Principles of Lasers, Fifth edition, *Springer Science+Business Media, LLC*, 2010, 620 p.
11. Website of ANSYS, Inc. Available at: <http://www.ansys.com/> (accessed 1.12.2015)