

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 535.231.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ БОКОВОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКИ YAG:Nd-ЛАЗЕРА

© 2012 г. В. В. Виткин**; И. Г. Кучма*; Д. И. Лычагин**; В. П. Покровский*; В. М. Поляков*

* Научно-производственная корпорация “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

** Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: v.v.v@bk.ru

В статье представлен выбор элементной базы для создания эффективной системы накачки YAG:Nd-лазера с энергией моноимпульса 60 мДж. Предложена оригинальная конструкция системы накачки усилителя. Экспериментально исследована эффективность трех типов осветителей для усилителя: с селективными диэлектрическими покрытиями, с неселективными металлическими покрытиями, а также с неселективными металлическими покрытиями из фосфатного стекла, легированного ионами самария.

Ключевые слова: боковая диодная накачка, поперечная диодная накачка, YAG:Nd-лазер, осветитель из стекла, легированного Sm^{3+} .

Коды OCIS: 140.3480, 140.5560

Поступила в редакцию 04.06.2012

Применение лазеров в качестве источников излучения в дальномерах космического базирования [1–4] предъявляет к системе накачки особые требования: компактность, эффективность использования излучения линеек лазерных диодов для накачки активных элементов небольшого объема, возможность обеспечения надежности системы путем включения спаренных модулей накачки в нагруженном резерве.

При разработке систем накачки генератора и усилителя лазера для проекта “Фобос-Грунт” [4] была поставлена цель достижения высокой равномерности прокачки активных элементов и получения приемлемой эффективности накачки. Решение этой задачи осложняется малым диаметром активных элементов, выбранным исходя из соображений поддержания высокого усиления для эффективного съема запасенной энергии.

Для получения представлений об эффективности схожих систем накачки были рассмотрены следующие работы. Лазер с квантроном [5], имеющий диффузный отражатель, с диаметром активного элемента 3 мм и концентрацией ио-

нов Nd 1%, эффективность системы накачки которого 46,3% [6]. В работе [7] представлен лазер с зеркальным отражателем, активным элементом диаметром 4 мм и концентрацией ионов Nd 1%, эффективность данной системы накачки составила 27,7%. В лазере с квантроном, в котором для подвода излучения накачки используются цилиндрические микролинзы, была получена эффективность системы накачки 42,1% [8]. В этой системе используется активный элемент диаметром 4 мм с концентрацией ионов Nd 1,1%. Приведенные цифры эффективности системы накачки пересчитаны из дифференциального коэффициента полезного действия лазера.

В генераторе лазера проекта “Фобос-Грунт” достигается энергия импульса 3 мДж, усилитель обеспечивает на выходе энергию импульса 60 мДж.

Для обеспечения генерации импульса с энергией 3 мДж в плоском резонаторе с пассивным затвором была выбрана решетка лазерных диодов (РЛД) РЛД-3 (НПП “Инжект”) мощностью 300 Вт и предельной длительно-

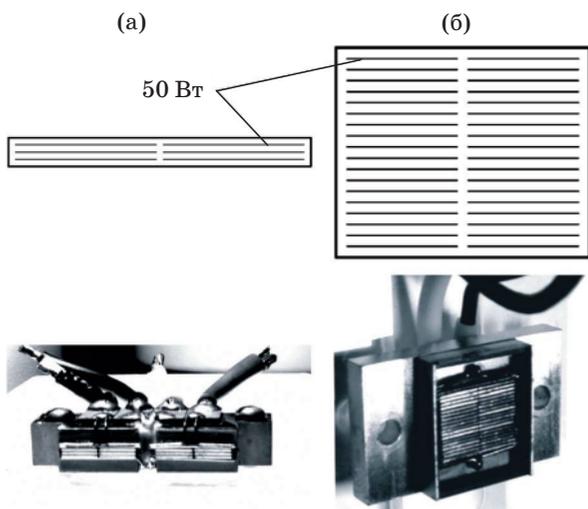


Рис. 1. Схемы расположения линеек лазерных диодов и фотографии РЛД-3 (а) и РЛД-4 (б).

стью импульса 350 мкс с геометрией расположения линеек, приведенной на рис. 1, и активный элемент диаметром 1,6 мм. В соответствии с требованием по двукратному резервированию электрорадиоизделий в технике космического назначения в системе накачки генератора задействованы две решетки лазерных диодов мощностью по 300 Вт каждая, включенных в нагруженном резерве.

В усилителе были использованы активные элементы диаметром 3,2, 3,5 и 4 мм. Для накачки были выбраны две РЛД-4 мощностью 1,8 кВт каждая (НПП “Инжект”; схема расположения линеек – на рис. 1) с рабочей длительностью импульса 300 мкс. Два активных элемента были размещены рядом в одном осветителе, что создает возможность достижения большей длины активной среды в поперечном

направлении для поглощения накачки при том же диаметре, позволяющем поддерживать высокий коэффициент усиления. При этом для обеспечения максимальной компактности осветителя РЛД были сформированы в прямоугольные излучающие площадки размером 9×10 мм. Для обеспечения равномерности прокачки активных элементов РЛД размещены напротив друг друга со сдвигом по оси активных элементов. Напротив каждой РЛД расположено высокоотражающее зеркало. Таким образом был реализован принцип светового котла с высокой степенью заполнения активной среды излучением накачки.

На рис. 2 приведена геометрия системы накачки усилителя в двух проекциях.

На рис. 2а представлен ход наиболее характерных лучей по оси большей расходимости излучения лазерных диодов накачки. Видны как прямые пути до активных элементов, так и пути, содержащие одно или несколько отражений. Штриховой линией обозначен луч, претерпевший отражение от поверхности матрицы лазерных диодов между излучателями. На рис. 2б показано смещенное зеркальное расположение двух матриц лазерных диодов накачки, выполненное для достижения равномерности прокачки сечения активного элемента.

Как следует из рис. 2а, активные элементы расположены параллельно друг другу и занимают значительную часть сечения пути следования излучения накачки. На рис. 2б активные элементы расположены один за другим.

На все поверхности осветителя нанесены зеркальные покрытия кроме входных окон напротив лазерных диодных матриц, на которых нанесено просветляющее покрытие.

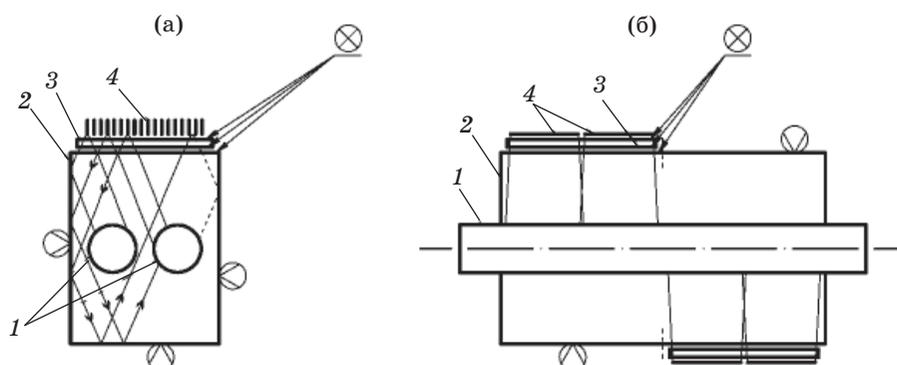


Рис. 2. Геометрия системы накачки в 2-х проекциях. 1 – активный элемент, 2 – отражатель, 3 – защитное стекло, 4 – линейки лазерных диодов.

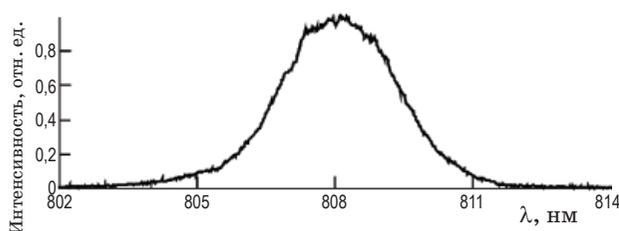


Рис. 3. Спектр излучения РЛД-3.

Экспериментально полученный спектр излучения РЛД иллюстрирует рис. 3.

Параметры использованных РЛД

Расходимость в плоскости <i>p-n</i> перехода по полувысоте	10°
Расходимость в плоскости, перпендикулярной <i>p-n</i> переходу по полувысоте	35°
Ширина спектра излучения по полувысоте	5 нм
Температурный сдвиг длины волны	0,35 нм/К
Рабочая температура	48 °С

Для оценки зависимости эффективности системы накачки от температуры РЛД была составлена расчетная модель, выполняющая свертку спектра излучения РЛД и спектра поглощения YAG:Nd. На основании данной модели построена зависимость эффективности системы накачки для разных температур РЛД. На рис. 4 приведен график расчетной зависимости в сравнении с полученными экспериментальными результатами. Для обеспечения эффективной работы системы накачки при изменениях температуры окружающей среды была применена система термостабилизации, поддерживающая температуру РЛД $+48 \pm 1$ °С в диапазоне температур крепежной поверхности лазера от -10 °С до $+30$ °С. Из графика на рис. 4 видно, что эффективность системы накачки сохранится в пределах 90% от максимума в диапазоне температур крепежной поверхности лазера от -15 °С до $+35$ °С.

Многопроходная схема накачки предъявляет повышенные требования к зеркалам осветителя: при многократных проходах излучения потери накачки растут в геометрической прогрессии. При совершении многократных обходов системы невозможно выделить приоритетные углы падения и отражения накачки. По этой причине требуется обеспечить высокий коэффициент отражения во всем диапазоне углов вплоть до угла полного внутреннего от-

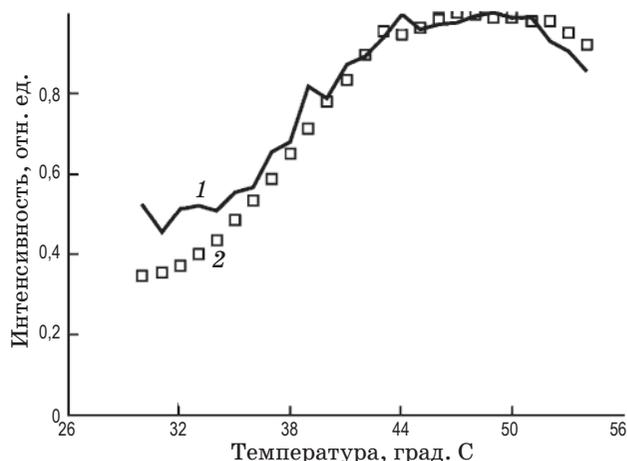


Рис. 4. Зависимость эффективности системы накачки от температуры лазерных диодов. 1 – результаты, полученные из расчетной модели, 2 – результаты эксперимента.

ражения (ПВО). Для люминесценции, возникающей в активной среде, условие многопроходности выполняется ровно так же, как и для излучения накачки. Это делает систему склонной к самовозбуждению. Для повышения порога самовозбуждения в осветителе необходимо выдерживать условие селекции длины волны накачки во всем диапазоне углов работы отражающего покрытия.

При имеющемся уровне накачки усилителя коэффициент усиления поперек оптической оси активных элементов может достигать 1,3–1,4. Чтобы избежать самовозбуждения, было предложено два варианта исполнения осветителя: с селективными диэлектрическими покрытиями и с металлическими покрытиями в сочетании с поглощающим на длине волны генерации материалом осветителя. Селективные диэлектрические покрытия рассчитаны таким образом, чтобы иметь высокий коэффициент отражения на длине волны накачки и достаточно низкий для подавления самовозбуждения на длине волны генерации. Осветитель с металлическими покрытиями был изготовлен из фосфатного стекла, легированного ионами самария [9, 10]. Сравнительные кривые для различных типов осветителей приведены на рис. 5.

Низкая эффективность осветителя с диэлектрическими покрытиями обусловлена наличием у покрытия области углов падения, для которых коэффициент отражения накачки невелик. В силу того, что излучение накачки

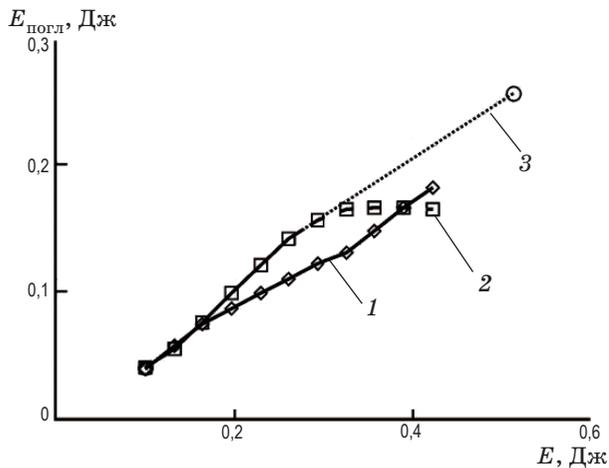


Рис. 5. Зависимость поглощенной энергии от энергии накачки. 1 – диэлектрические покрытия, 2 – серебрение (нелинейный участок имеет физический смысл только для запасенной энергии, загиб характеристики соответствует началу паразитной генерации внутри осветителя), 3 – серебрение, осветитель изготовлен из стекла, легированного Sm^{3+} (измерение проводилось при максимальном уровне накачки).

совершает большое число проходов, потери на выход накачки через область с малым коэффициентом отражения оказались велики (рис. 6). В результате измерений было определено, что около половины энергии накачки выходит из осветителя. На рис. 6 приведен график зависимости отражения диэлектрических покрытий от угла падения.

Полученная эффективность системы накачки для осветителя с диэлектрическими покрытиями – 42,5%, с металлическими покрытиями она составила 52%. Лазерные диоды, собранные в матрицы для максимальной компактности, снизили эффективность системы за счет потери площади отражающей поверхности осветителя в промежутках между линейками лазерных диодов. При уменьшении входных окон для излучения накачки за счет

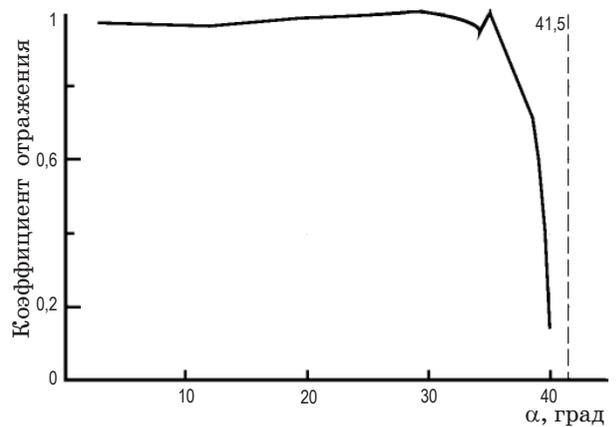


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения диэлектрического покрытия от угла падения α для длины волны 808 нм (значения углов приведены для падения света изнутри осветителя, $41,5^\circ$ – угол ПВО).

согласования их геометрии с отдельными линейками лазерных диодов и реализации принципа светового котла возможно повысить эффективность системы накачки. Наибольшую эффективность без потерь на паразитную генерацию показал осветитель с металлическими покрытиями, изготовленный из стекла, легированного Sm^{3+} . На нем удалось получить энергию импульса на выходе лазера 70 мДж.

Таким образом, были экспериментально исследованы три типа осветителей для усилителя. Наибольшую эффективность без потерь на паразитную генерацию показал осветитель, изготовленный из стекла, легированного Sm^{3+} . Эффективность системы накачки данного осветителя составила 52%. Была составлена расчетная модель, позволяющая оценить эффективность поглощения излучения накачки с учетом реального спектра излучения накачки и спектра поглощения YAG:Nd . Результаты, полученные в модели, подтверждены экспериментально.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas N., Spohnb T., Barriot J.-P., Benz W., Beutler G., Christensene U., Dehant V., Fallnichg C., Giardini D., Groussini O., Gundersona K., Hauber E., Hilchenbache M., Iess L., Lamyk P., Loral L.-M., Lognonnem P., Lopez-Morenol J.J., Michaelis H., Oberst J., Resendes D., Reynaudk J.-L., Rodrigol R., Sasaki S., Seiferlina K., Wiczorekm M., Whitbya J. The Bepi Colombo Laser Altimeter (BELA): Concept and baseline design // Planetary and Space Science. 2007. V. 55 P. 1398–1413.

2. Ramos-Izquierdo L., Scott III S.V., Connelly J., Schmidt S., Mamakos W., Guzek J., Peters C., Liiva P., Rodriguez M., Cavanaugh J., Riris H. Optical system design and integration of the Lunar Orbiter Laser Altimeter // *Appl. Opt.* 2009. V. 48. № 16. P. 3035–3049.
 3. Krebs D.J., Novo-Gradac A.M., Li S.X., Lindauer S.J., Afzal R.S., Yu A.W. Compact, passively Q-switched Nd:YAG laser for the MESSENGER mission to Mercury // *Appl. Opt.* 2005. V. 44. № 9. P. 1715–1718.
 4. Поляков В.М., Покровский В.П., Сомс Л.Н. Лазерный передающий модуль с переключаемой диаграммой направленности для космического аппарата “Фобос-Грунт” // *Оптический журнал.* 2011. Т. 78. № 10. С. 4–9.
 5. Гречин С.Г., Николаев П.П. Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой // *Квант. электрон.* 2009. Т. 39. № 1. С. 1–17.
 6. Wang Y., Kan H. Improvement on evaluating absorption efficiency of a medium rod for LD side-pumped solid-state lasers // *Opt. Commun.* 2003. V. 226. Iss. 1–6. P. 303–316.
 7. Wu R., Phua P.B., Lai K.S. Linearly polarized 100 W output from a dode-pumped Nd:YAlO laser // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. Iss. 3. P. 431–434.
 8. Golla D., Knoke S., Schone W., Ernst G., Bode M., Tunnermann A., Welling H. 300 W cw diode-laser “side-pumped Nd:YAG rod laser” // *Opt. Lett.* 1995. V. 20. Iss. 10. P. 1148–1150.
 9. Hideji Mizutani, Hidetsugu Yoshida, Hideki Yagi, Hajime Okada, Kana Fujioka Hisanori Fujita, Masahiro Nakatsuka. Suppression of laser parasitic oscillation used trivalent samarium in Nd:YAG ceramic composite rod // *Conf. Institute of Laser Engineering.* 2006. V. 20. № 6. P. 207–208.
 10. Yagi H., Bisson J.F., Ueda K., Yanagitani T. $Y_3Al_5O_{12}$ ceramic absorbers for the suppression of parasitic oscillation in high-power Nd:YAG lasers // *Journal of Luminescence.* 2006. V. 121. № 1. P. 88–94.
-