

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-12-14-23

УДК 621.373.826

Компактный мощный субнаносекундный микрочип-лазер на кристалле Nd:YAG/Cr:YAG, работающий без системы термостабилизации

Михаил Дмитриевич Яковин¹✉, Дмитрий Васильевич Яковин²,
Алексей Валерьевич Грибанов³

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^{1, 2, 3}Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

¹m.d.yakovin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6849-8197>

²yakovin@iae.nsk.su <https://orcid.org/0000-0001-8508-7667>

³gribanov84@mail.ru <https://orcid.org/0009-0000-1802-6610>

Аннотация

Предмет исследования. Лабораторный макет малогабаритной микрочип-лазерной системы, в состав которого входят излучатель на основе активного кристалла Nd:YAG/Cr:YAG с пассивной модуляцией добротности, система накачки — мультиволновая матрица лазерных диодов, состоящая из 5 линеек лазерных диодов, система линз для коллимации и фокусировки излучения накачки, а также источник питания лазерных диодов. **Цель работы.** Разработать и исследовать компактный, портативный, микрочип-лазер с высокой пиковой мощностью и энергией в импульсе, работающий в широком температурном диапазоне. **Метод.** Благодаря использованию в качестве источника накачки мультиволновой лазерной диодной линейки лазер не требует сложных схем термостабилизации. Система коллимации по быстрой оси, разработанная для всех линеек лазерных диодов, обеспечивает эффективную и стабильную работу. **Основные результаты.** Продемонстрирована возможность применения массива мультиволновых лазерных диодов в качестве источника накачки микрочипового Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности на основе насыщающегося поглотителя Cr:YAG. Такая накачка позволяет работать без необходимости использования системы термостабилизации при типичных условиях окружающей среды. Создана малогабаритная микрочиповая лазерная система (с учётом источника питания лазерных диодов накачки объёмом порядка 1 дм³). При частоте следования импульсов лазерной диодной матрицы накачки 20 Гц и длительности 300 мкс средняя выходная мощность лазера составляет 203 мВт на длине волны 1064 нм. Энергия в импульсе генерации более 10 мДж, что соответствует пиковой мощности 50 МВт. Расходимость излучения — 3,5 мрад, диаметр пучка на расстоянии 500 мм от резонатора — 2 мм. Стабильность средней выходной мощности лазерной системы лучше 3% в диапазоне температур окружающей среды от 16 до 30 °C без использования системы термостабилизации. **Практическая значимость.** Разработан компактный источник мощных коротких импульсов, который может работать в широком диапазоне температур без системы термостабилизации, что делает его идеальным выбором для портативных систем и устройств. Он может найти применения в различных областях, таких как, оптическая локация и дальнометрия, зондирование атмосферы, спектроскопия, обработка материалов и нелинейная оптика.

Ключевые слова: микрочип-лазер, гранат-неодимовый лазер, пассивная модуляция добротности, алюмоиттриевый гранат, легированный хромом, диодная накачка, юстировка

Благодарность: авторы выражают благодарность Алексею Редюку (НГУ) и Сергею Микерину (ИАиЭ СО РАН) за полезную помощь в подготовке статьи. Авторы выражают благодарность сотрудникам компании ООО «АКАДЕМЛАЗЕРМАШ» за полезные обсуждения и идеи. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-72-30006).

Ссылка для цитирования: Яковин М.Д., Яковин Д.В., Грибанов А.В. Компактный мощный субнаносекундный микрочип-лазер на кристалле Nd:YAG/Cr:YAG, работающий без системы термостабилизации // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 12. С. 13–23. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-14-23>

Коды OCIS: 140.3530, 140.3480, 140.3540, 220.3620.

Compact powerful subnanosecond microchip laser based on Nd:YAG/Cr:YAG crystal operating without thermal stabilization system

MIKHAEL YAKOVIN¹✉, DMITRIY YAKOVIN², ALEKSEY GRIBANOV³

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

^{1, 2, 3}Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹m.d.yakovin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6849-8197>

²yakovin@iae.nsk.su <https://orcid.org/0000-0001-8508-7667>

³gribanov84@mail.ru <https://orcid.org/0009-0000-1802-6610>

Abstract

Subject of study. Laboratory model of a small-sized microchip laser system, which includes an emitter based on an Nd:YAG/Cr:YAG active crystal with passive Q-switching, a pumping system — a multiwave laser diode array consisting of 5 laser diode bars, a lens system for collimation and focusing pump radiation, as well as a power source for laser diodes. The **aim of the work** is to develop and research a compact, portable microchip laser with high peak power and energy per pulse operating over a wide temperature range. **Method.** Due to the use of a multiwavelength laser diode array as a pump source, the laser does not require complex thermal stabilization circuits. The fast axis collimation system developed for all laser diode lines ensures efficient and stable performance. **Main results.** The possibility of using the array of multiwavelength laser diodes as a pump source for the passive Q-switched microchip Nd:YAG laser based on a saturable Cr:YAG absorber is demonstrated. This pumping allows to avoid using thermal stabilization system under typical environmental conditions. The small-sized microchip laser system (the volume is 1 dm³ together with the power supply of pump laser diodes) has been created. At a pulse repetition rate of the laser diode pump array of 20 Hz and a duration of 300 μs, the average output power of the laser is 203 mW at a wavelength of 1064 nm. The energy in the generation pulse is more than 10 mJ, which corresponds to a peak power of 50 MW. The radiation divergence is 3.5 mrad, the beam diameter at a distance of 500 mm from the resonator is about 2 mm. The stability of the average output power of the laser system is better than 3% in the ambient temperature range from 16 to 30 °C without the use of the thermal stabilization system. **Practical significance.** The compact source of the powerful short pulses has been developed; it can operate over a wide temperature range without the thermal stabilization system, which makes it an ideal choice for portable systems and devices. It can find application in various fields, such as optical location and rangefinding, atmospheric probing, spectroscopy, material processing and non-linear optics.

Keywords: microchip laser, Nd:YAG laser, passive Q-switching, Cr:YAG, diode pumping, alignment

Acknowledgment: the authors express their gratitude to Alexey Redyuk (NSU) and Sergey Mikerin (IAiE SB RAS) for useful assistance in the preparation of the article. The authors express their gratitude to the coworkers of the company "АКАДЕМЛАЗЕРМАШ" LLC for useful discussions

and ideas. The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation (project No. 17-72-30006).

For citation: Yakovin M.D., Yakovin D.V., Griбанov A.V. Compact powerful subnanosecond microchip laser based on Nd:YAG/Cr:YAG crystal operating without thermal stabilization system [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 12. P. 14–23. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-14-23>

OCIS codes: 140.3530, 140.3480, 140.3540, 220.3620.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые микрочип-лазер Nd:YAG с пассивной модуляцией добротности на основе насыщающегося поглотителя Cr:YAG и схемы продольной накачки от лазерных диодов был описан в [1]. Эти лазеры имеют простую конструкцию, низкую стоимость и компактные размеры. Кроме того, они обладают отличными выходными характеристиками: высокой энергией импульса (1–10 мДж) и длительностью импульсов от нескольких наносекунд до сотен пикосекунд. В результате они широко используются в различных областях, таких как альтиметрия [2, 3], лидарные приложения [4, 5], спектроскопия [6, 7], обработка материалов [8] и нелинейная оптика [9–11], кроме того, они могут применяться, например, в системах зажигания двигателей [12].

Пассивная модуляция добротности в микрочип-лазерах обычно достигается при непрерывной накачке [11, 13, 14]. В таких случаях выходные импульсы имеют частоту следования несколько сотен кГц [14] и энергию несколько мкДж [13, 14]. Реализация импульсной накачки с частотой повторения в несколько десятков Гц снижает нагрев и позволяет получать в таких лазерах энергию в импульсе почти 10 мДж [2, 3] при хорошем качестве пучка и длительности импульса порядка 230 пс. В работе [15] была достигнута выходная энергия импульса в 20 мДж при квазипродольной схеме накачки, длительность импульса составила 5–7 нс, устройство также работало без системы термостабилизации в пределах от –40 до 50 °С. Такой интервал температур достигался за счёт подбора диода накачки с диапазоном смещения длины волны, лежащим в области поглощения Nd:YAG-кристалла (790–820 нм) и выбора длины кристалла, равной 50 мм, для того, чтобы обеспечить эффективное поглощение во всем диапазоне смещения длины волны накачки.

Микрочип-лазеры с пассивной модуляцией добротности представляют собой монолитные устройства с входным зеркалом, нанесённым на входную грань активного кристалла, и диффузионно-связанным участком насыщающегося поглотителя. Выходное зеркало либо нанесено на выходную грань кристалла, либо расположено на небольшом расстоянии от неё. Микрочип-лазеры Nd:YAG имеют длину резонатора порядка 10 мм и менее, что позволяет генерировать импульсы субнаносекундной длительности [16–18]. Однако для стабильной работы микрочип-лазеров необходима термостабилизация источника оптической накачки из-за зависимости длины волны генерации диодного лазера от температуры (примерно 0,3 нм/°С). Это накладывает ограничения на климатические условия работы, увеличивает энергопотребление системы и требует времени для выхода на рабочую температуру перед началом работы.

В последнее время стали доступны диодные матрицы, которые имеют температурный диапазон работы от –50 °С до +75 °С и не требуют системы термостабилизации при нормальных условиях окружающей среды (типичная комнатная температура и влажность) [19]. Это достигается использованием усовершенствованной системы теплоотвода лазерного диода, а также проектированием линейки лазерных диодов с различной длиной волны генерации с шагом 3 нм в области поглощения кристалла Nd:YAG. В результате поглощённая мощность накачки в кристалле Nd:YAG имеет флуктуацию всего 5,2% в диапазоне температур от 30 °С до +90 °С [19].

Целью этой работы было создать и исследовать Nd:YAG-микрочип-лазер с пассивной модуляцией добротности с энергией выходного импульса порядка 10 мДж, с ультракороткими импульсами 0,1–1 нс и импульсной накачкой от мультиволновой матрицы лазерных диодов, не требующей для своей работы системы термостабилизации.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для фокусировки излучения накачки была разработана оптическая схема, которая обеспечивала плотность энергии излучения линейки лазерных диодов в кристалле Nd:YAG более 5 Дж/см². На рис. 1а показана схема экспериментальной установки, включающая лазерный диод с системой микролинз для коллимации излучения по быстрой оси (ФАС — fast axis collimation), а также линзы, предназначенные для фокусировки излучения накачки в активный элемент микрочип-лазера. Расстояния между линзами определялись конструктивными характеристиками оправ линз и составляли 2 мм между ФАС-системой микролинз лазерного диода 1 и сферической линзой 2 и 0,5 мм между сферической 2 и цилиндрической 3 линзами. Фокусное расстояние

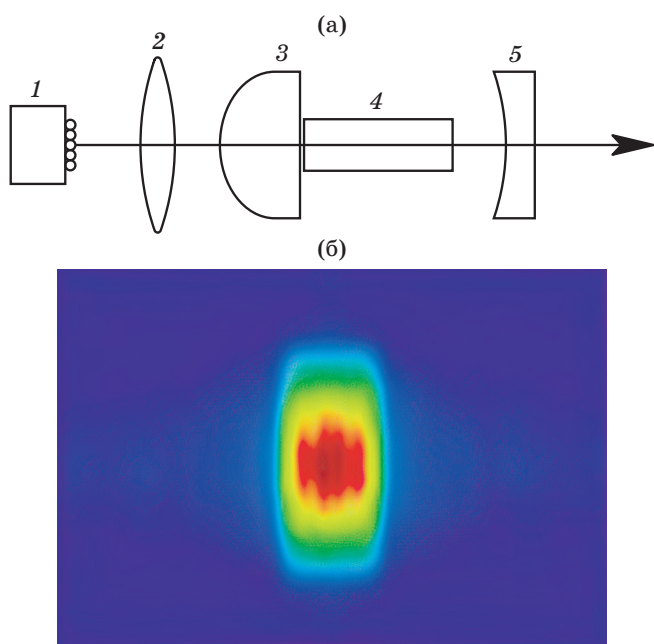


Рис. 1. Экспериментальная установка. (а) Схема установки. 1 — лазерный диод с коллимирующей линзой по быстрой оси, 2 — сферическая линза, 3 — цилиндрическая линза, 4 — активный элемент, 5 — выходное зеркало; (б) расчётное распределение излучения накачки в фокусе согласующей оптической схемы

Fig. 1. Experimental setup. (a) Setup diagram. 1 — a laser diode with a collimating lens along the fast axis, 2 — a spherical lens, 3 — a cylindrical lens, 4 — an active media, and 5 — an output mirror; (б) calculated distribution of pump radiation at the focus of the matching optical scheme

сферической линзы составляло 14,3 мм. Цилиндрическая линза с фокусным расстоянием 9,6 мм была вплотную прикреплена к входной грани активного кристалла. В качестве активного элемента использовался диффузионно-спаянный кристалл Nd:YAG/Cr:YAG диаметром 3 мм и длиной 11 мм, состоящий из двух частей: участок Nd:YAG длиной 9 мм с легированием 1,1% Nd³⁺ и участок Cr:YAG длиной 2 мм с начальным коэффициентом пропускания 20%. Резонатор имел общую длину 14 мм и состоял из двух зеркал. Входное зеркало с высоким (более 99,5%) коэффициентом отражения на длине волны лазерного излучения 1064 нм и высоким (более 95%) пропусканием для излучения накачки 800–820 нм было нанесено непосредственно на торец лазерного кристалла со стороны Nd:YAG. На выходную грань активного кристалла со стороны Cr:YAG было нанесено просветляющее покрытие для излучения 1064 нм (пропускание более 99,5%). Сферическое выходное зеркало имело радиус кривизны 9,6 м и пропускание 40% на длине волны 1064 нм. Схема накачки была спроектирована и рассчитана с помощью программного пакета Zemax. Главной целью было выравнивание расходимости излучения накачки по вертикальной (быстрой) и горизонтальной (медленной) осям и получение наиболее симметричного пятна накачки в активном элементе. На рис. 1б показано распределение интенсивности излучения накачки в активном элементе, полученное при расчёте. Фокус системы оптической накачки располагался в активном кристалле на расстоянии 2 мм от входной грани.

В качестве источника накачки использовалась матрица лазерных диодов (FocusLight FL-GS04-5x1-750-808-Q), состоящая из 5 линеек лазерных диодов с центральной длиной волны 808 нм и пиковой выходной мощностью около 900 Вт с расходимостью 35° по быстрой оси и 8° по медленной оси. Спектральная ширина излучения составляла примерно 15 нм, а сама матрица была рассчитана на работу в диапазоне температур от -45 °С до +75 °С. Данные испытаний для используемого массива лазерных диодов при температуре окружающей среды 25 °С, частоте повторения импульсов 25 Гц и длительности импульса 200 мкс показаны на рис. 2. На рис. 2б также приведена зависимость коэффициента

поглощения кристалла Nd:YAG (кривая 1) от длины волны. Эта зависимость была получена расчётным путём, параметры кристалла были заданы те же, что и у кристалла, использованного в экспериментальной установке. Из рисунка видно, что спектр излучения лазерных диодов хорошо совпадает с пиком поглощения активного кристалла.

Для уменьшения расходимости по быстрой оси излучения матрицы лазерных диодов была разработана коллимирующая ФАС-система. Она состояла из пластинки (плавленый кварц толщиной 100 мкм) с просветляющими

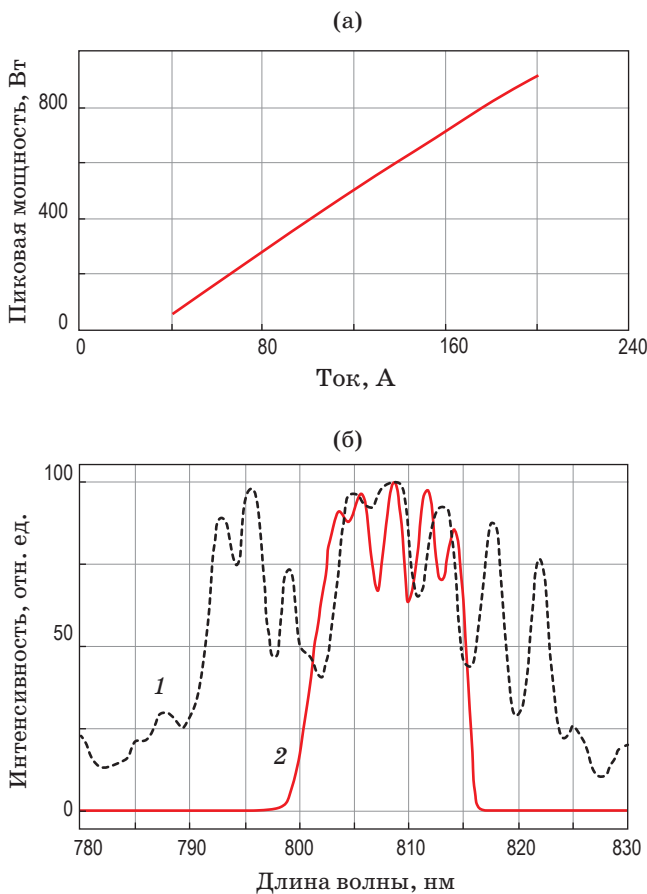


Рис. 2. Характеристики матрицы лазерных диодов и активного кристалла. (а) Зависимость мощности лазерных диодов от тока, (б) зависимость поглощённой мощности в кристалле Nd:YAG от длины волны (кривая 1) и спектр излучения лазерного диода накачки (кривая 2)

Fig. 2. Characteristics of the laser diode array and the active crystal. (a) Dependence of the laser diode power on the current, (b) dependence of the absorbed power in the Nd:YAG crystal on the wavelength (curve 1) and the emission spectrum of the pump laser diode (curve 2)

покрытиями на область 800–820 нм и цилиндрических микролинз, изготовленных из оптического волокна (плавленый кварц диаметром 400 мкм). Пластика служила для согласования излучения диодных линеек с микролинзами. С помощью УФ-клея пластинка крепилась к матрице лазерных диодов,

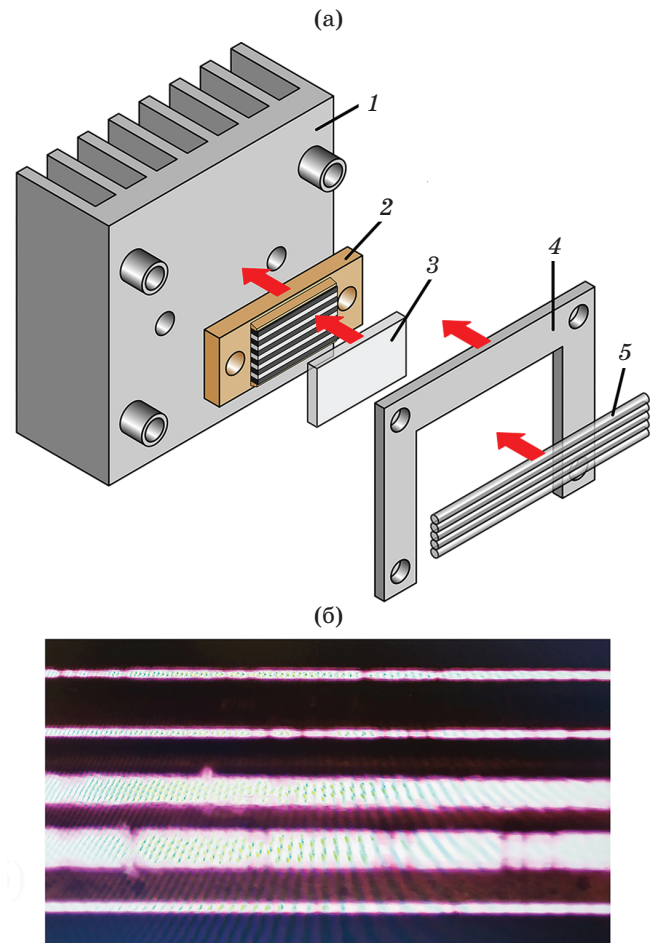


Рис. 3. Установка матрицы лазерных диодов и коллимирующей по быстрой оси линзы. (а) Схема установки элементов: 1 — радиатор, 2 — диодная матрица, 3 — кварцевая пластинка, 4 — П-образная рамка, 5 — цилиндрические микролинзы; (б) вид лазерных диодных излучателей при установке и юстировке цилиндрических микролинз; узкие полосы — без микролинз, широкие — с совмещёнными микролинзами

Fig. 3. Installation of a laser diode array and a fast-axis collimating lens. (a) Scheme of elements installation: 1 — radiator, 2 — diode array, 3 — quartz plate, 4 — U-shaped frame, 5 — cylindrical microlenses; (b) view of laser diode emitters during installation and adjustment of cylindrical microlenses; narrow bands — without microlenses, wide bands — with combined microlenses

а кварцевые цилиндры прикреплялись к инваровой П-образной раме, которая вместе с матрицей лазерных диодов устанавливалась на радиаторе. Расположение указанных элементов схематически показано на рис. 3а. Юстировка каждой микролинзы контролировалась с помощью микроскопа по изображению на ПЗС-камере (рис. 3б). Расходимость излучения лазерного диода после такой коллимирующей системы составляла 3° и 8° по быстрой и медленной осям соответственно. Средняя мощность накачки после установки пластинки и цилиндрических микролинз составила 5,1 Вт при частоте 20 Гц и длительности импульса накачки 300 мкс (пиковая мощность 850 Вт). Рабочий ток лазерного диода составлял 200 А.

На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов накачки и генерации. При частоте следования импульсов 20 Гц была получена средняя мощность выходного излучения 203 мВт, что соответствует энергии в импульсе не менее 10 мДж. Расходимость излучения составила 3,5 мрад, диаметр пучка на расстоянии 0,5 м от резонатора составлял примерно 2 мм. Длительность импульса накачки варьировалась от 50 до 350 мкс. При длительности накачки менее 280 мкс генерация отсутствовала, при длительности импульса более 350 мкс генерация переходила в двухимпульсный режим. При длительности импульса 300 мкс была достигнута максимальная стабильность генерации в одноимпульсном режиме (появления

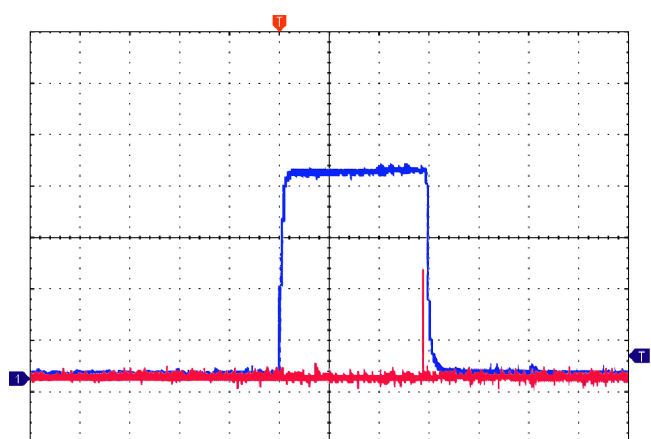


Рис. 4. Осциллограмма прямоугольного импульса излучения накачки и импульса генерации лазера. Цена деления по оси абсцисс 100 мкс

Fig. 4. Oscillogram of a rectangular pump and laser pulse. Division value along the abscissa axis is 100 μ s

второго импульса не наблюдалось). При этом нестабильность (среднее отклонение) амплитуды импульсов генерации от импульса к импульсу была меньше $\pm 5\%$.

На рис. 5 представлена осциллограмма длительности импульса генерации, измеренная с помощью PIN-фотодиода ET 3500 (Electro-Optics Technology) с полосой пропускания 12,5 ГГц и осциллографа Tektronix MSO72004C с полосой пропускания 20 ГГц. Длительность импульса, измеренная на полувысоте, составляла 200 пс, что соответствует пиковой выходной мощности 50 МВт.

На рис. 6 представлена измеренная зависимость средней выходной мощности лазера от температуры окружающей среды в лаборатории. Приведённая зависимость свидетельствует о том, что разработанный лазер способен работать со стабильностью средней выходной мощности лучше 3% в достаточно широком диапазоне температур (типичные условия эксплуатации) без необходимости использования системы термостабилизации. Важно отметить, что в каждой точке зависимости, представленной на рис. 6, лазер работал 4–6 часов. Температура окружающей среды менялась как по сезонам года в период проведения исследования, так и под влиянием системы кондиционирования воздуха. При этом температура лазерных диодов была выше температуры окружающей среды на 20°C . Такая стабильность выходной мощности отчасти объясняется наличием мультиволновой диодной накачки. Однако представляет интерес более подробно рассмотреть эффект сдвига

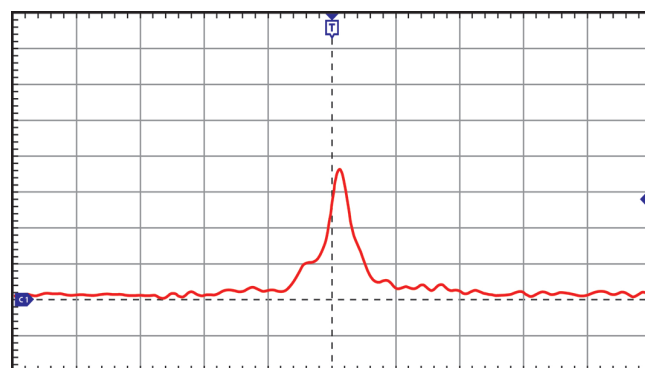


Рис. 5. Осциллограмма импульса генерации лазера. Цена деления по оси абсцисс 400 пс

Fig. 5. Oscillogram of the laser pulse. Scale division along the abscissa axis is 400 ps

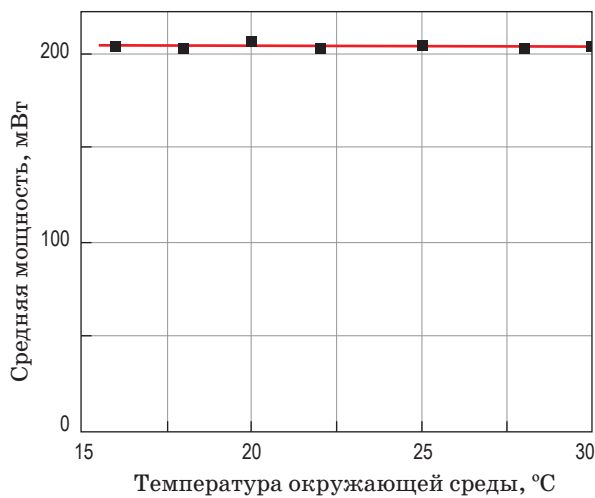


Рис. 6. Зависимость средней выходной мощности лазера от температуры окружающей среды

Fig. 6. Dependence of the average laser output power on the ambient temperature

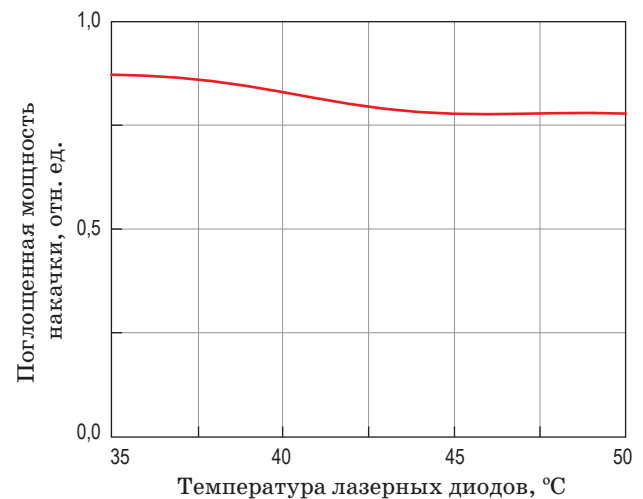


Рис. 7. Зависимость поглощённой мощности накачки от температуры лазерных диодов

Fig. 7. Dependence of the absorbed pump power on the laser diode temperature

спектра лазерных диодов при изменении их температуры.

Спектр поглощения активного кристалла изменяется незначительно в интервале температур 15–30 °C. Используя температурный сдвиг спектра накачки, можно рассчитать температурные изменения поглощаемой мощности в активном элементе и сравнить их с зависимостью выходной мощности лазера от температуры. На рис. 7 показана рассчитанная температурная зависимость доли поглощённой мощности многоволнового лазерного диода накачки. При расчёте было учтено, что температура лазерных диодов на 20 °C выше температуры окружающей среды. Из приведённого графика видно, что в указанном интервале температур величина поглощённой мощности накачки изменяется примерно на 9%. Несмотря на то, что это довольно существенное изменение, оно не оказывает влияния на выходную мощность лазера. Своеобразным демпфирующим фактором, стабилизирующим выходную мощность, как мы полагаем, является комбинация пассивной модуляции добротности и импульсной накачки. Изменение поглощённой мощности приводит к изменению скорости накачки, что, в случае непрерывной накачки, приводило бы к изменению частоты импульсов генерации лазера и к изменению его выходной мощности. В нашем случае частота импульсов генерации

определяется частотой и длительностью импульсов накачки, поэтому в некоторых пределах не происходит изменения выходной мощности лазера.

Оценим потребляемую мощность разработанной лазерной системы. Она состоит только из электроэнергии для излучения массива лазерных диодов, так как для работы не нужны другие источники питания, например, для системы охлаждения. Эффективность преобразования (КПД) массива лазерных диодов составляет более 40%, следовательно, средняя потребляемая электрическая мощность равна $5,1 \text{ Вт}/40\% = 12,8 \text{ Вт}$. Так в качестве источника питания для этой лазерной системы может использоваться, например, литий-ионный аккумулятор с запасённой энергией 25,5 Вт·ч. С подобным блоком питания лазерная система будет работать около 2-х часов, такое низкое энергопотребление важно для различных задач, особенно для портативных систем и устройств.

В нашем лабораторном макете драйвер лазерного диода имел размеры 200×100×80 мм. Таким образом, вся лазерная система уместилась на листе формата А4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье сообщается о малогабаритной микрочиповой лазерной системе (объёмом 1 дм³, включая источник питания линейки лазер-

ных диодов накачки). При частоте следования импульсов лазерной диодной матрицы накачки 20 Гц и длительности 300 мкс средняя выходная мощность лазера составляет 203 мВт на длине волны 1064 нм. Энергия в импульсе генерации более 10 мДж, что соответствует пиковой мощности 50 МВт. Расходимость излучения 3,5 мрад, диаметр пучка на расстоянии 500 мм от резонатора примерно равен 2 мм. Стабильность средней выходной мощности лазерной системы лучше 3% в диапазоне температур окружающей среды от 16 до 30 °С.

Мы продемонстрировали возможность применения массива мультиволновых лазерных диодов в качестве источника накачки микро-

чипового Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности на основе насыщающегося поглотителя Cr:YAG. Такая накачка обеспечивает работу лазера без необходимости использования системы термостабилизации при типичных условиях окружающей среды. Полученный лазер можно легко интегрировать в любые компактные бортовые системы, используемые в таких широких областях, как лидары, альтиметрия и дальнометрия, обработка материалов. Высокая пиковая мощность разработанной системы позволяет создавать малогабаритные системы с безрезонаторным эффективным нелинейным преобразованием частоты — генераторы второй и третьей гармоник, параметрические генераторы света.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zayhowski J.J., Dill C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers // *Optics letters*. 1994. V. 19. № 18. P. 1427–1429. <https://doi.org/10.1364/OL.19.001427>
2. Krebs D.J., Novo-Gradac A.M., Li S.X., Lindauer S.J., Afzal R.S., Anthony W.Y. Compact, passively Q-switched Nd: YAG laser for the MESSENGER mission to Mercury // *Applied Optics*. 2005. V. 44. № 9. P. 1715–1718. <https://doi.org/10.1364/AO.44.001715>
3. Kallenbach R., Murphy E., Gramkow B., Rech M., Weidlich K., Leikert T., Henkelmann R., Trefzger B., Metz B., Michaelis H., Lingenauber K., DelTogno S., Behnke T., Thomas N., Piazza D., Seiferlin K. Space-qualified laser system for the BepiColombo Laser Altimeter // *Applied Optics*. 2013. V. 52. № 36. P. 8732–8746. <https://doi.org/10.1364/AO.52.008732>
4. Krichbaumer W., Herrmann H., Nagel E., Häring R., Streicher J., Werner C., Mehnert A., Halldorsson T., Heinemann S., Peuser P., Schmitt N.P. A diode-pumped Nd: YAG lidar for airborne cloud measurements // *Optics & Laser Technology*. 1993. V. 25. № 5. P. 283–287. [https://doi.org/10.1016/0030-3992\(93\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0030-3992(93)90015-8)
5. Binks D.J., Golding P.S., King T.A. Compact all-solid-state high repetition rate tunable ultraviolet source for airborne atmospheric gas sensing // *Journal of Modern Optics*. 2000. V. 47. № 11. P. 1899–1912. <https://doi.org/10.1080/09500340008232442>
6. Lopez-Moreno C., Smith B.W., Gornushkin I.B., Omenetto N., Palanco S., Laserna J.J., Winefordner J.D. Quantitative analysis of low-alloy steel by microchip laser induced breakdown spectroscopy // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2005. V. 20. № 6. P. 552–556. <https://doi.org/10.1039/B419173K>
7. Neumann J., Lang T., Huss R., Ernst M., Moalem A., Kolleck C., Kracht D. Development of a pulsed laser system for laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) // *International Conference on Space Optics — ICSO 2012*. 105642J. 20 November 2017. *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10564. P. 655–660. <https://doi.org/10.1117/12.2309093>

REFERENCES

1. Zayhowski J.J., Dill C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers // *Optics Letters*. 1994. V. 19. № 18. P. 1427–1429. <https://doi.org/10.1364/OL.19.001427>
2. Krebs D.J., Novo-Gradac A.M., Li S.X., Lindauer S.J., Afzal R.S., Anthony W.Y. Compact, passively Q-switched Nd: YAG laser for the MESSENGER mission to Mercury // *Applied Optics*. 2005. V. 44. № 9. P. 1715–1718. <https://doi.org/10.1364/AO.44.001715>
3. Kallenbach R., Murphy E., Gramkow B., Rech M., Weidlich K., Leikert T., Henkelmann R., Trefzger B., Metz B., Michaelis H., Lingenauber K., DelTogno S., Behnke T., Thomas N., Piazza D., Seiferlin K. Space-qualified laser system for the BepiColombo Laser Altimeter // *Applied Optics*. 2013. V. 52. № 36. P. 8732–8746. <https://doi.org/10.1364/AO.52.008732>
4. Krichbaumer W., Herrmann H., Nagel E., Häring R., Streicher J., Werner C., Mehnert A., Halldorsson T., Heinemann S., Peuser P., Schmitt N.P. A diode-pumped Nd: YAG lidar for airborne cloud measurements // *Optics & Laser Technology*. 1993. V. 25. № 5. P. 283–287. [https://doi.org/10.1016/0030-3992\(93\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0030-3992(93)90015-8)
5. Binks D.J., Golding P.S., King T.A. Compact all-solid-state high repetition rate tunable ultraviolet source for airborne atmospheric gas sensing // *Journal of Modern Optics*. 2000. V. 47. № 11. P. 1899–1912. <https://doi.org/10.1080/09500340008232442>
6. Lopez-Moreno C., Smith B.W., Gornushkin I.B., Omenetto N., Palanco S., Laserna J.J., Winefordner J.D. Quantitative analysis of low-alloy steel by microchip laser induced breakdown spectroscopy // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2005. V. 20. № 6. P. 552–556. <https://doi.org/10.1039/B419173K>
7. Neumann J., Lang T., Huss R., Ernst M., Moalem A., Kolleck C., Kracht D. Development of a pulsed laser system for laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) // *International Conference on Space Optics — ICSO 2012*. 105642J. 20 November 2017. *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10564. P. 655–660. <https://doi.org/10.1117/12.2309093>

8. Ancona A., Nodop D., Limpert J., Nolte S., Tünnermann A. Microdrilling of metals with an inexpensive and compact ultra-short-pulse fiber amplified microchip laser // *Applied Physics A*. 2009. V. 94. P. 19–24. <https://doi.org/10.1007/s00339-008-4906-3>
9. Bhandari R., Taira T. Above 6 MW peak power at 532 nm from passively Q-switched Nd: YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser // *Optics Express*. 2011. V. 19. № 20. P. 19135–19141. <https://doi.org/10.1364/OE.19.019135>
10. Bhandari R., Taira T., Miyamoto A., Furukawa Y., Tago T. Above 3 MW peak power at 266 nm using Nd: YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser and fluxless-BBO // *Optical Materials Express*. 2012. V. 2. № 7. P. 907–913. <https://doi.org/10.1364/OME.2.000907>
11. Гao Ш. Пассивная модуляция добротности YVO₄/Nd:YVO₄/KTP-лазера зеленого диапазона с внутрирезонаторным удвоением частоты и с насыщающимся поглотителем из GaAs // *Квантовая электроника*. 2015. Т. 45. № 11. С. 1000–1002. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n11ABEH01582912>
12. Tsunekane M., Inohara T., Ando A., Kido N., Kanehara K., Taira T. High peak power, passively Q-switched microlaser for ignition of engines // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2010. V. 46. № 2. P. 277–284. <https://doi.org/10.1109/JQE.2009.2030967>
13. Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Кондратюк Н.В., Кулешов Н.В. Высокочастотный Yb-микролазер с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности // *Квантовая электроника*. 2009. Т. 39. № 11. С. 1018–1022. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n11ABEH01415114>
14. Донг Ю., Хе Ю., Чжоу С., Бай Ш. Высокоэффективный универсальный микроchip-лазер айнс-гауссовых мод с самомодуляцией добротности и высокой частотой следования импульсов для оптического захвата // *Квантовая электроника*. 2016. Т. 46. № 3. С. 218–222. <https://doi.org/10.1070/QEL15826>
15. Вайншенкер А.Е., Виленский А.В., Казаков А.А., Лысой Б.Г., Михайлов Л.К., Пашков В.А. Лазер на YAG:Nd³⁺ с диодной накачкой, работающий в режиме модуляции добротности в широком интервале температур без термостабилизации диодов накачки // *Квантовая электроника*. 2013. Т. 43. № 2. С. 114–116. <https://doi.org/10.1070/QE2013v043n02ABEH015036>
16. Zayhowski J.J., Wilson A.L. Pump-induced bleaching of the saturable absorber in short-pulse Nd: YAG/Cr/sup⁴⁺:YAG passively Q-switched microchip lasers // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2003. V. 39. № 12. P. 1588–1593. <https://doi.org/10.1109/JQE.2003.819535>
17. Sakai H., Kan H., Taira T. Above 1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd³⁺:YAG microchip laser // *Optics Express*. 2008. V. 16. № 24. P. 19891–19899. <https://doi.org/10.1364/OE.16.019891>
18. Wang Y., Gong M., Yan P., Huang L., Li D. Stable polarization short pulse passively Q-switched monolithic microchip laser with [110] cut Cr⁴⁺:YAG // *Laser Physics Letters*. 2009. V. 6. № 11. P. 788. <https://doi.org/10.1002/lapl.200910079>
19. Hou D., Yin X., Wang J., Chen S., Zhan Y., Li X., Fan Y., Liu X. High power multiple wavelength diode laser stack for DPSSL application without temperature control // *Proceedings of SPIE*. 2018. V. 10513. P. 167–178. <https://doi.org/10.1117/12.2291169>
8. Ancona A., Nodop D., Limpert J., Nolte S., Tünnermann A. Microdrilling of metals with an inexpensive and compact ultra-short-pulse fiber amplified microchip laser // *Applied Physics A*. 2009. V. 94. P. 19–24. <https://doi.org/10.1007/s00339-008-4906-3>
9. Bhandari R., Taira T. Above 6 MW peak power at 532 nm from passively Q-switched Nd: YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser // *Optics Express*. 2011. V. 19. № 20. P. 19135–19141. <https://doi.org/10.1364/OE.19.019135>
10. Bhandari R., Taira T., Miyamoto A., Furukawa Y., Tago T. Above 3 MW peak power at 266 nm using Nd: YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser and fluxless-BBO // *Optical Materials Express*. 2012. V. 2. № 7. P. 907–913. <https://doi.org/10.1364/OME.2.000907>
11. Gao S. Passively Q-switched, intracavity frequency-doubled YVO₄/Nd: YVO₄/KTP green laser with a GaAs saturable absorber // *Quantum Electronics*. 2015. V. 45. № 11. P. 1000–1002. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n11ABEH015829>
12. Tsunekane M., Inohara T., Ando A., Kido N., Kanehara K., Taira T. High peak power, passively Q-switched microlaser for ignition of engines // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2010. V. 46. № 2. P. 277–284. <https://doi.org/10.1109/JQE.2009.2030967>
13. Kisel V.E., Yasukevich A.S., Kondratyuk N.V., Kuleshov N.V. Diode-pumped passively Q-switched high-repetition-rate Yb microchip laser // *Quantum Electronics*. 2009. V. 39. № 11. P. 1018–1022. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n11ABEH014151>
14. Dong J., He, Y., Zhou X., Bai S. Highly efficient, versatile, self-Q-switched, high-repetition-rate microchip laser generating Ince–Gaussian modes for optical trapping // *Quantum Electronics*. 2016. V. 46. № 3. P. 218–222. <https://doi.org/10.1070/QEL15826>
15. Vainshenker A.E., Vilenskiy A.V., Kazakov A.A., Lysoy B.G., Mikhailov L.K., Pashkov V.A. Diode-pumped Q-switched Nd³⁺: YAG laser operating in a wide temperature range without thermal stabilization of pump diodes // *Quantum Electronics*. 2013. V. 43. № 2. P. 114–116. <https://doi.org/10.1070/QE2013v043n02ABEH015036>
16. Zayhowski J.J., Wilson A.L. Pump-induced bleaching of the saturable absorber in short-pulse Nd: YAG/Cr/sup⁴⁺:YAG passively Q-switched microchip lasers // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2003. V. 39. № 12. P. 1588–1593. <https://doi.org/10.1109/JQE.2003.819535>
17. Sakai H., Kan H., Taira T. Above 1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd³⁺:YAG microchip laser // *Optics Express*. 2008. V. 16. № 24. P. 19891–19899. <https://doi.org/10.1364/OE.16.019891>
18. Wang Y., Gong M., Yan P., Huang L., Li D. Stable polarization short pulse passively Q-switched monolithic microchip laser with [110] cut Cr⁴⁺:YAG // *Laser Physics Letters*. 2009. V. 6. № 11. P. 788. <https://doi.org/10.1002/lapl.200910079>
19. Hou D., Yin X., Wang J., Chen S., Zhan Y., Li X., Fan Y., Liu X. High power multiple wavelength diode laser stack for DPSSL application without temperature control // *Proceedings of SPIE*. 2018. V. 10513. P. 167–178. <https://doi.org/10.1117/12.2291169>

АВТОРЫ

Михаил Дмитриевич Яковин — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия; научный сотрудник, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 55935457400, <https://orcid.org/0000-0002-6849-8197>, m.d.yakovin@mail.ru

Дмитрий Васильевич Яковин — научный сотрудник, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 6603011703, <https://orcid.org/0000-0001-8508-7667>, yakovin@iae.nsk.su

Алексей Валерьевич Грибанов — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 57197666407, <https://orcid.org/0009-0000-1802-6610>, gribanov84@mail.ru

AUTHORS

Mikhail D. Yakovin — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia; Researcher, Institute of automation and electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 55935457400, <https://orcid.org/0000-0002-6849-8197>, m.d.yakovin@mail.ru

Dmitry V. Yakovin — Researcher, Institute of automation and electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 6603011703, <https://orcid.org/0000-0001-8508-7667>, yakovin@iae.nsk.su

Alexey V. Gribanov — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute of automation and electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 57197666407, <https://orcid.org/0009-0000-1802-6610>, gribanov84@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 28.06.2023
Одобрена после рецензирования 11.08.2023
Принята к печати 30.10.2023*

*The article was submitted to the editorial office 28.06.2023
Approved after review 11.08.2023
Accepted for publication 30.10.2023*