

## Пикосекундный Nd:YAG лазер с широким рабочим температурным диапазоном (–40... +40 °С)

© А. Ф. Корнев<sup>1</sup>, Ю. В. Кацев<sup>1</sup>, В. В. Коваль<sup>1,2</sup>, Д. О. Оборотов<sup>1</sup>, И. Г. Кучма<sup>1</sup>, В. А. Митряев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Лазеры и оптические системы», г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Пикосекундные лазеры широко используются в различных промышленных и научных приложениях. Одним из таких приложений является высокоточная спутниковая лазерная дальнометрия. Современное состояние высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии требует стабильных и надежных лазеров с короткой длительностью импульса, высокой частотой следования импульсов и высоким уровнем устойчивости к условиям окружающей среды для достижения наибольшей точности измерений.

В настоящей работе представлены результаты разработки Nd:YAG лазера, построенного по схеме «задающий генератор — регенеративный усилитель — генератор второй гармоники» и предназначенного для прецизионной спутниковой локации. В качестве задающего генератора используется пикосекундный лазерный диод, работающий в режиме модуляции усиления. Регенеративный усилитель основан на двух Nd:YAG активных элементах  $\varnothing 6 \times 30$  мм с торцевой диодной накачкой. В качестве генератора второй гармоники используется кристалл LBO  $5 \times 5 \times 10$  со II типом фазового синхронизма.

Лазер излучает импульсы длительностью 35 пс на длине волны 532 нм с энергией  $> 2.5$  мДж и стабильностью  $< 2\%$  (СКО). Эффективность преобразования во вторую гармонику составила до 65%. Частота следования импульсов — 300 Гц, возможна работа на частоте до 1000 Гц. Расходимость излучения составляет 0.3 мрад по уровню интенсивности  $1/e^2$  при диаметре пучка на выходе лазера 3.4 мм. Главной особенностью разработанной системы является возможность работы при температуре окружающей среды от –40 до +40 °С, что достигается за счет следующих технических решений: термостабилизация корпуса лазера при помощи жидкостного контура с использованием чиллера, а также применение системы гибких нагревателей и многослойной теплоизоляции корпуса.

Лазер установлен на дальномере «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое». Короткая длительность импульса, высокая стабильность формы импульса и энергии импульса, а также возможность работы в широком диапазоне температур окружающей среды делают этот лазер востребованным инструментом для высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии.

**Ключевые слова:** Nd:YAG лазер, регенеративный усилитель, пикосекундные импульсы, генерация второй гармоники, широкий температурный диапазон, спутниковая лазерная локация.

*Контакты для связи: Коваль Владислав Вячеславович (kovalvlad@yandex.ru).*

**Для цитирования:** Корнев А. Ф., Кацев Ю. В., Коваль В. В., Оборотов Д. О., Кучма И. Г. Пикосекундный Nd:YAG-лазер с широким рабочим температурным диапазоном (–40... +40 °С) // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 57. С. 16–22.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.16-22>

## Picosecond Nd:YAG Laser with Wide Temperature Operation Range (–40... +40 °C)

A. F. Kornev<sup>1</sup>, Yu. V. Katsev<sup>1</sup>, V. V. Koval<sup>1,2</sup>, D. O. Oborotov<sup>1</sup>, I. G. Kuchma<sup>1</sup>, V. A. Mitryaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lasers and Optical Systems Co. Ltd., Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup>IAA RAS, Saint-Petersburg, Russia

### Abstract

Picosecond lasers are widely used in various industrial and scientific applications. One of them is high-precision satellite laser ranging. The current state of the art for high-precision satellite laser ranging requires stable and reliable lasers with short pulse duration, high pulse repetition rates, and a high level of resistance to the ambient environment in order to achieve the highest measurement accuracy.

Here we report on the development of Nd:YAG laser based on «master oscillator — regenerative amplifier — second harmonic generation» approach and applied for high-precision satellite laser ranging. A picosecond laser diode operating in the gain switch mode is used as a master oscillator. The regenerative amplifier is based on two Nd:YAG rods

$\varnothing 6 \times 30$  mm with diode end pumping. The LBO crystal  $5 \times 5 \times 10$  mm with type II phase matching is used as the second harmonic generator.

Laser delivers 35 ps pulses at 532 nm wavelength with  $> 2.5$  mJ pulse energy with  $< 2\%$  energy stability (RMS). The second-harmonic conversion efficiency was up to 65 %. The pulse repetition rate is 300 Hz (up to 1000 Hz is possible). The beam divergence is 0.3 mrad at  $1/e^2$  intensity level for a beam diameter at the laser output of 3.4 mm. The main feature of the developed system is the possibility to operate at ambient temperatures from  $-40$  to  $+40$  °C that is achieved by proper thermal management: liquid thermal stabilization of the laser body using a chiller, as well as the use of a system of flexible heaters and multilayer thermal insulation.

The laser is installed on the «Sazhen-TM» rangefinder in the observatory «Svetloe». The short pulse duration, high stability of the pulse shape and the pulse energy, as well as the possibility to operate in a wide range of ambient temperatures make this laser a demand tool for high-precision satellite laser ranging.

**Keywords:** Nd:YAG laser, regenerative amplifier, picosecond pulses, second harmonic generation, wide temperature range, Satellite Laser Ranging.

*Contacts:* Vladislav V. Koval ([kovalvlad@yandex.ru](mailto:kovalvlad@yandex.ru)).

**For citation:** Kornev A. F., Katsev Yu. V., Koval V. V., Oborotov D. O., Kuchma I. G., Mitryaev V. A. Picosecond Nd:YAG laser with wide temperature operation range ( $-40... +40$  °C) // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 57. P. 16–22. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.16-22>

## Введение

Пикосекундные лазеры широко используются в различных промышленных и научных приложениях. Диапазон их применения варьируется от лазерной микрообработки материалов ([Cheng, 2009](#)) и медицинских приложений ([Hsu, 2016](#)) до научных задач, таких как накачка параметрических усилителей ([Hong, 2016](#)), атомная и молекулярная спектроскопия ([Yaney, 2000](#)), диагностика плазмы ([Vogel, 2006](#); [Kornev, 2019](#)).

Одним из приложений лазеров с пикосекундной длительностью импульса является прецизионная спутниковая лазерная дальнометрия (СЛД). СЛД — один из основных инструментов для изучения геодинамики, геодезии, геофизики и астрономии ([Tapley, 1993](#); [Cheng, 2011](#)). Один из первых экспериментов по спутниковой локации был проведен в 1964 г. с использованием рубинового лазера с ламповой накачкой и модуляцией добротности. Лазер генерировал импульсы с энергией  $\sim 0.8$  Дж, длительностью до  $\sim 2$  мкс и частотой следования импульсов 1 Гц ([Plotkin, 1965](#)). Позже стали применяться более компактные и эффективные Nd:YAG лазеры с длительностью импульса  $< 10$  нс ([Forrester, 1981](#)). Значительный прорыв в точности измерений СЛД произошел за счет использования Nd:YAG лазеров, работающих в режиме синхронизации мод и генерирующих импульсы с длительностью  $\sim 30$  пс. Эти лазеры все еще имели низкую частоту следования импульсов ( $\sim 10$  Гц) из-за использования ламповой накачки, а длительность импульса в экспериментах по СЛД часто увеличивалась до  $\sim 200$  пс для снижения рисков повреждения оптических элементов. Однако это незначительно влияло на точность измерений, так как применяемые фотоумножители с высоким коэффициентом усиления обладали довольно большим импульсным откликом ( $\sim 450$  пс) ([Degnan, 1985](#)). В сети российских станций СЛД

приоритет отдавался простым и надежным лазерным системам с пассивной модуляцией добротности и длительностью импульса 300–400 пс ([Wilkinson, 2019](#)).

Современное состояние высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии требует стабильных и надежных лазеров с короткой длительностью импульса ( $< 50$  пс), высокой частотой следования импульсов ( $\sim 1$  кГц) и высоким уровнем устойчивости к условиям окружающей среды для достижения наибольшей точности измерений ([Wilkinson, 2019](#); [Haifeng, 2020](#)). На новейших станциях СЛД в NASA используется лазер Photonics Industries (RG-532), который генерирует импульсы с энергией 2.5 мДж, длительностью импульса 50 пс и частотой следования импульсов до 5 кГц. Температурный диапазон работы используемой лазерной системы составляет от  $+15$  до  $+30$  °C, причем лазер и приемная система располагаются на оптическом стенде, установленном в отдельном помещении, в котором температура поддерживается с точностью  $\pm 1.5$  °C, что накладывает определенные ограничения на конструкцию станции СЛД ([MacGary, 2019](#)). Поэтому существует интерес к разработке компактных лазерных систем для СЛД, способных работать в широком диапазоне температур окружающей среды.

В настоящей работе представлены результаты разработки Nd:YAG лазера, построенного по схеме «задающий генератор — регенеративный усилитель — генератор второй гармоники» и предназначенного для прецизионной спутниковой локации. Лазер излучает импульсы длительностью 35 пс на длине волны 532 нм с энергией импульса  $> 2.5$  мДж и частотой следования импульсов 300 Гц. Главной особенностью системы является возможность работы при температуре окружающей среды от  $-40$  до  $+40$  °C, что достигается за счет соответствующих приемов терморегулирования.

## Схема лазера

Лазер разработан по принципу: задающий генератор (ЗГ) — регенеративный усилитель (РУ) — генератор второй гармоники (ГВГ). Оптическая схема лазера приведена на рис. 1.

В качестве ЗГ использован DFB-лазер (от англ. distributed feedback laser) с волоконным выводом излучения в одномодовое волокно с сохранением поляризации. DFB-лазер представляет собой инжекционный полупроводниковый лазер, обратная связь в котором создаётся за счёт отражения световых волн от периодической решётки показателя преломления, созданной в активной среде. DFB-лазер работает в режиме модуляции усиления (gain switch) и генерирует импульсы на длине волны 1064 нм длительностью  $\sim 35$  пс, энергией  $\sim 1$  пДж, и требуемой частоты следования (от одиночных до 250 МГц). Применение DFB-лазера позволило использовать электрическую синхронизацию в лазере из-за низкого джиттера ( $< 10$  пс) по сравнению с микрочип-лазером, используемым в работе (Kornev, 2018), где применялась оптическая синхронизация.

Усиление излучения ЗГ реализовано в РУ, который представляет собой многопроходный усилитель с управляемым количеством обходов. Такой подход позволяет достигать высокого усиления ( $> 10^9$ ) при сравнительно небольшом слабосигнальном коэффициенте усиления ( $\sim 2 \dots 3$ ).

Для защиты ЗГ использован высококонтрастный изолятор Фарадея ( $\sim 90$  дБ). Он состоит из двух ступеней: миниатюрный однопроходный изолятор с поглощающими поляризаторами и двухпроходный изолятор с  $45^\circ$  вращателем Фарадея, диэлектрическим поляризатором и шпатовым клином, на заднюю грань которого нанесено зеркало на длину волны 1064 нм. После изолятора

Фарадея излучение ЗГ проходит через телескоп, который обеспечивает согласование кривизны волнового фронта излучения ЗГ с  $TEM_{00}$  модой резонатора.

Резонатор РУ построен по кольцевой схеме с нечетным числом зеркал, поляризационным выводом и призмой Дове, что обеспечивает низкую чувствительность к разъюстировке резонатора повороту изображения в обеих плоскостях после каждого обхода резонатора.

Для управления количеством обходов резонатора РУ использован оптический переключатель — ячейка Погкельса на основе двух кристаллов RTP X-среза ( $4 \times 4 \times 10$  мм) и высокоскоростного электрооптического драйвера (время нарастания  $< 2$  нс). Излучение ЗГ вводится в резонатор РУ в  $p$ -поляризации, многократно усиливается в  $s$ -поляризации и затем проходит через поляризатор в  $p$ -поляризации.

В качестве усиливающей среды в РУ используются два цилиндрических активных элемента Nd:YAG  $\varnothing 6 \times 30$  мм с кондуктивным охлаждением. Концентрация  $Nd^{3+}$  в активных элементах составляет 0.2 ат. % и обеспечивает равномерное распределение накачки вдоль активных элементов и предотвращение перегрева входного торца. Между активными элементами установлен  $90^\circ$  кварцевый вращатель поляризации для компенсации термически наведенного двулучепреломления (Koechner, 2013). Величина деполаризованной компоненты излучения после каждого обхода резонатора составляет  $< 0.3$  %.

В лазере применяется продольная схема накачки лазерными диодными модулями мощностью до 170 Вт на длине волны 808 нм с волоконным выводом с диаметром жилы волокна 200 мкм.

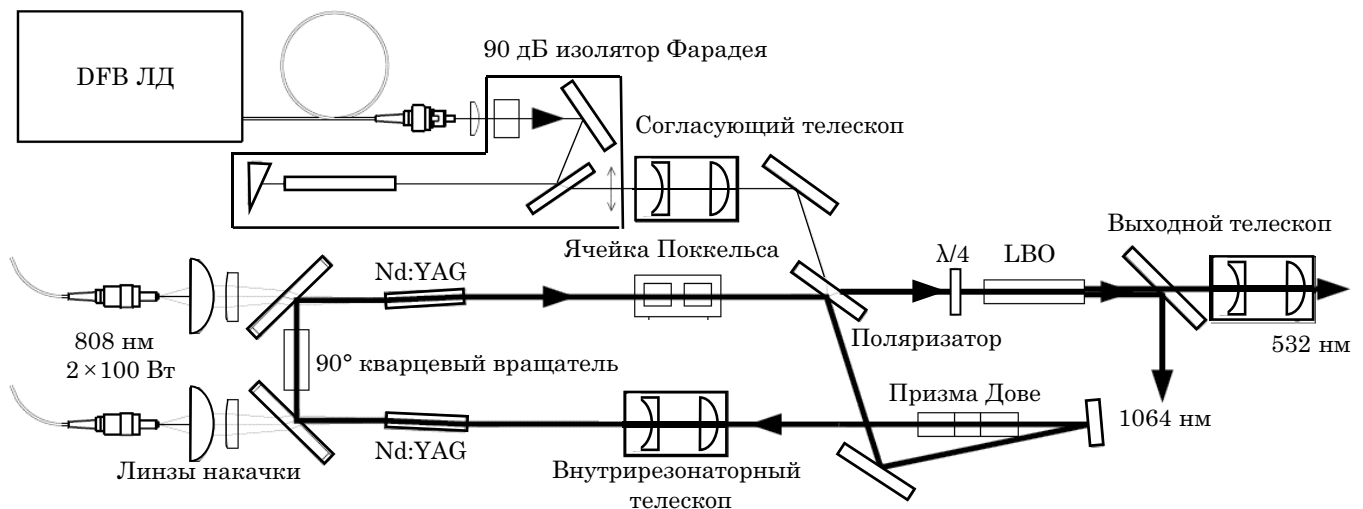


Рис. 1. Оптическая схема лазера

Двухлинзовая схема накачки с переносом изображения торца волокна и  $10\times$  увеличением обеспечивает близкое к равномерному распределение усиления в поперечном сечении вдоль активных элементов.

Внутрирезонаторный телескоп с увеличением  $M = 1.6$  использован в РУ для увеличения размера моды в активных элементах и для компенсации термически наведенной линзы. Применение внутрирезонаторного телескопа позволяет настраивать конфигурацию резонатора на близкую к конфокальной при частотах следования импульсов от одиночных до 1000 Гц, что обеспечено за счет изменения расстояния между линзами телескопа. Конфокальный резонатор обеспечивает низкие дифракционные потери и низкую чувствительность к разъюстировке резонатора, клиновым аберрациям и изменениям оптической силы термически наведенной линзы в активных элементах.

Для генерации второй гармоники использован кристалл LBO ( $5 \times 5 \times 10$  мм, ориентация:  $\theta = 20.9^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ) с фазовым синхронизмом II типа и четвертьволновая фазовая пластина. Излучение на длинах волн 1064 и 532 нм пространственно разделено дихроичным зеркалом. Для компенсации геометрической расходимости и получения требуемого размера пучка на выходе лазера ( $d = 3.4$  мм) используется телескоп с увеличением  $M = 2.3$ .

### Экспериментальные результаты

На рис. 2 приведена зависимость энергии импульса на длине волны 1064 нм от длительности импульса накачки (при фиксированной импульсной мощности накачки — 100 Вт) и количества обходов РУ. Расчет проводился с использованием итерационного вычисления уравнения Франца – Нодвика (Koechner, 2013). Максимальная энергия импульса составила 5.0 мДж при длительности импульса накачки 200 мкс и 44 обходах РУ. Очевидно, что в РУ есть оптимальные условия усиления, потерь и количества обходов. В некоторых случаях увеличение энергии накачки приводит к уменьшению максимальной энергии импульса из-за изменений потерь излучения на каждом обходе резонатора РУ (например, дифракционных потерь, вызванных изменением термически наведенной линзы в активных элементах).

Длительность импульса на длине волны 1064 нм была измерена двумя способами. На рис. 3а показана автокорреляционная функция импульса, измеренная в коллинеарной схеме генерации второй гармоники. Ширина автокорреляционной функции по полувысоте составила 52.2 пс, при этом функция хорошо аппроксимировалась функцией  $\text{sech}^2$ , поэтому длительность выходного импульса оценивалась как  $\sim 33.8$  пс с учетом соответствующего коэффициента деконволюции 0.648 (Curtis, 1986).

На рис. 3б показана осциллограмма в режиме накопления  $> 10^4$  наложенных импульсов, измеренная осциллографом Agilent DSO81204В с полосой 12 ГГц и фотодиодом EOT-5000F с полосой

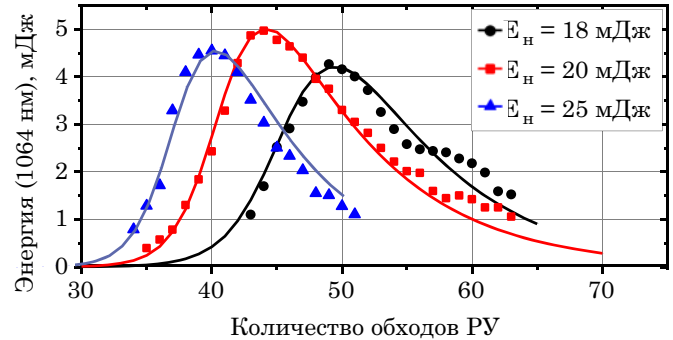


Рис. 2. Зависимость выходной энергии импульса на длине волны 1064 нм от количества обходов при различной энергии импульса накачки ( $E_H$ ). Сплошными линиями обозначены результаты моделирования

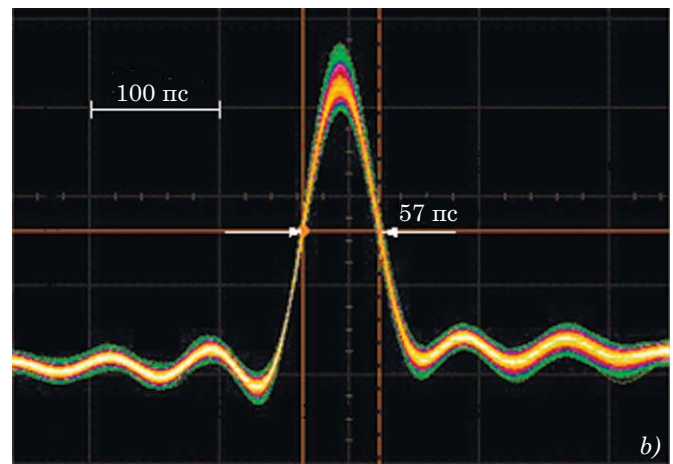
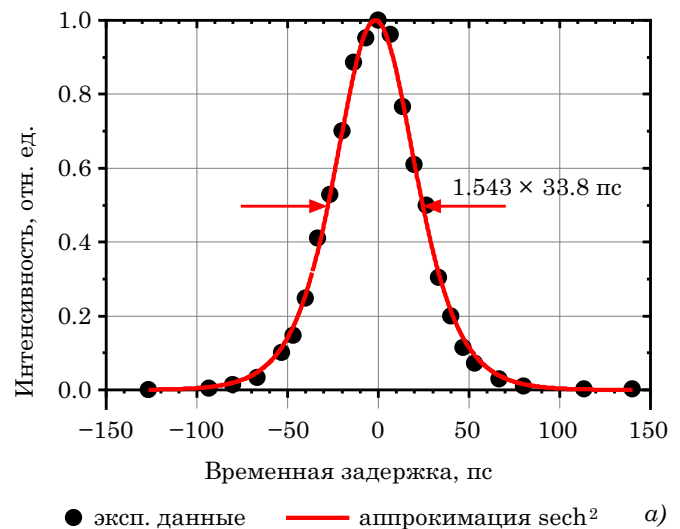


Рис. 3. Автокорреляционная функция импульса (а), осциллограмма импульса в режиме накопления (б)



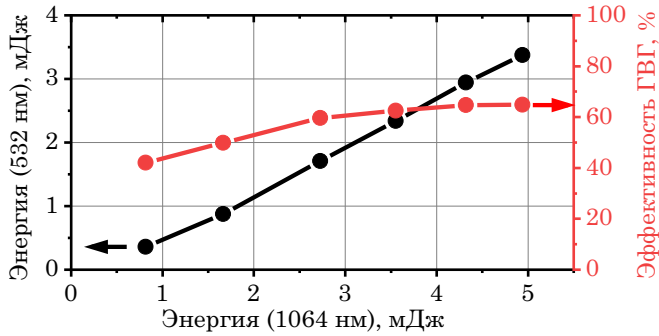


Рис. 4. Зависимость энергии на длине волны 532 нм и эффективности ГВГ от падающей энергии на длине волны 1064 нм

10 ГГц. Измеренная длительность импульса по полувисоте составила 57 пс со среднеквадратичным отклонением 1.5 %. Принимая во внимание импульсную характеристику нашей измерительной системы, длительность импульса была оценена как  $\tau \sim \sqrt{(57 \text{ пс})^2 - (0.35/12 \text{ ГГц})^2 - (0.35/10 \text{ ГГц})^2} = 34.2 \text{ пс}$ , поскольку измеренные данные представляют собой свертку реальной формы лазерного импульса с импульсной характеристикой измерительной системы (Mittermayer, 1999). По нашим оценкам, сокращение длительности импульса на длине волны 532 нм незначительно.

На выходе РУ помимо основного усиленного импульса наблюдаются также пред- и постимпульсы, появление которых связано с конечным контрастом поляризационных элементов резонатора РУ, недокомпенсированным двулучепреломлением в активных элементах и нелинейными эффектами в ячейке Поккельса (Koval, 2020). Временное расстояние между этими импульсами соответствует времени обхода резонатора 8.3 нс. Контраст импульсов измерялся при помощи фотодиода и составил 1 : 200 на длине волны 1064 нм и 1 : 1000 — на длине волны 532 нм. Для увеличения контраста на длине волны 1064 нм можно использовать дополнительный селектор импульсов.

Зависимость выходной энергии на длине волны 532 нм и эффективности ГВГ от падающей на кристалл LBO энергии на длине волны 1064 нм показана на рис 4. Максимальная выходная энергия составила 3.2 мДж с эффективностью преобразования 65 % и стабильностью < 2 % (СКО).

Расходимость излучения на выходе лазера измерялась в фокальной плоскости зеркала с фокусным расстоянием  $f = 5 \text{ м}$  и составила 0.3 мрад по уровню интенсивности  $1/e^2$ .

### Обеспечение широкого рабочего температурного диапазона

Главной особенностью лазера является широкий рабочий температурный диапазон — от  $-40$  до  $+40$  °С, который обеспечивается, прежде всего, за

счет поддержания постоянной температуры корпуса излучателя лазера вблизи точки  $+20$  °С.

Корпус лазерного излучателя представляет собой моноблок, который изготовлен путем фрезерной обработки оксидированной дюралюминиевой заготовки. Поперечное сечение корпуса имеет вид двутавровой балки. В верхнем отсеке корпуса расположена оптическая схема РУ, в нижнем — модули накачки, ЗГ и управляющая электроника.

Снаружи корпуса лазерного излучателя расположена многослойная теплоизоляция на основе химически сшитого пенополиэтилена толщиной 20 мм. На корпусе лазера установлена распределенная система из тонкопленочных резистивных нагревателей суммарной мощностью до 75 Вт и датчиков температуры. При низких температурах окружающей среды эта система позволяет нагревать внешнюю поверхность корпуса и поддерживать его температуру вблизи точки  $+20$  °С. При температурах окружающей среды выше  $+20$  °С охлаждение корпуса лазера осуществляется с помощью чиллера S&A RM500 и установленного на тепловой контакт с корпусом лазера теплообменника, который представляет собой дюралюминиевую пластину с впрессованными в нее медными трубками. В системе охлаждения в качестве теплоносителя применялся 42 % раствор пропиленгликоля. Помимо термостабилизации корпуса лазера, задача теплообменника — кондуктивный отвод выделившегося в объеме лазера тепла, основным источником которого являются лазерные диодные модули накачки и активные элементы.

Чиллер расположен в отдельной термостабилизированной стойке питания и охлаждения. Термостабилизация стойки осуществляется керамическими нагревателями и системой вентиляторов. Шланги между чиллером и лазером теплоизолированы и оснащены нагревательным кабелем.

Проверка рабочего температурного диапазона лазерной системы проводилась с использованием климатической камеры Climcontrol M-60/100-1000 КТВХ. Во время климатических испытаний осуществлялся контроль средней выходной энергии

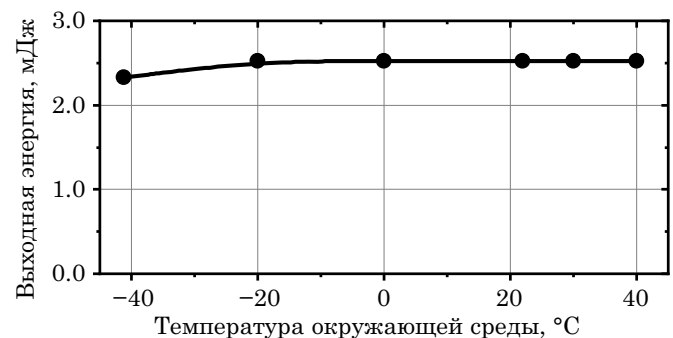


Рис. 5. Энергия выходного импульса при различных температурах окружающей среды



Рис. 6. Фото лазерного излучателя в обсерватории «Светлое»

импульса лазера при разной температуре окружающей среды. При каждой температуре измерялось среднее значение энергии лазера за 1 минуту работы. Результаты испытаний приведены на рис. 5. Как видно из графика, температура окружающей среды не влияет на среднее значение выходной энергии лазера.

Габаритные размеры лазерного излучателя составляют  $700 \times 245 \times 160$  мм. Габариты термостабилизированной стойки питания и охлаждения, в которой располагается чиллер, составляют  $600 \times 860 \times 875$  мм. Излучатель располагается на опорно-поворотном устройстве под внешним куполом дальномера «Сажень-ТМ». Стойка питания и охлаждения расположена в отдельном помещении на расстоянии  $\sim 5$  м от опорно-поворотного устройства дальномера «Сажень-ТМ». Фотография лазерного излучателя, установленного в обсерватории «Светлое», представлена на рис. 6.

## Заключение

В работе представлена разработка компактного пикосекундного Nd:YAG лазера, главной особенностью которого является возможность работы в широком температурном диапазоне от  $-40$  до  $+40^\circ\text{C}$ . Максимальная энергия в импульсе на длине волны 532 нм составила 3.2 мДж при эффективности преобразования 65 % и стабильности  $< 2$  % (СКО). Длительность импульса на выходе лазера составила  $\sim 35$  пс при стабильности 1.5 % (СКО). Частота следования импульсов — 300 Гц, возможна работа на частоте до 1000 Гц. Расходимость излучения — 0.3 мрад по уровню интенсивности  $1/e^2$  при диаметре пучка на выходе лазера 3.4 мм.

Короткая длительность импульса, высокая стабильность формы импульса и энергии импульса, а также возможность работы в широком диапа-

зоне температур окружающей среды делают этот лазер востребованным инструментом для СЛД.

## Благодарность

Авторы выражают глубокую благодарность Смоленцеву С. Г., Ипатову А. В., Иванову Д. В., Рахимову И. А. и всему коллективу обсерватории «Светлое» за оказанную поддержку.

## Литература

- Cheng J., Perrie W., Sharp M., Edwardson S. P., Semaltianos N. G., Dearden G., Watkins K. G. Single-pulse drilling study on Au, Al and Ti alloy by using a picosecond laser // *Appl. Phys. A*. 2009. Vol. 95, no. 3. P. 739–746.
- Hsu V. M., Aldahan A. S., Mlacker S., Shah V. V., Nouri K. The picosecond laser for tattoo removal // *Las. med. sc.* 2016. Vol. 31, no. 8. P. 1733–1737.
- Hong K. H., Huang S. W., Moses J., et al. High-energy, phase-stable, ultrabroadband kHz OPCPA at 2.1  $\mu\text{m}$  pumped by a picosecond cryogenic Yb: YAG laser // *Opt. exp.* 2016. Vol. 19, no. 16. P. 15538–15548.
- Yaney P. P., Kliner D. A., Schrader P. E., Farrow R. L. Distributed-feedback dye laser for picosecond ultraviolet and visible spectroscopy // *Rev. Sc. Instr.* 2000. Vol. 71, no. 3. P. 1296–1305.
- Vogel N. Diagnostics of picosecond laser pulse absorption in preformed plasma // *Appl. surf. sc.* 2006. Vol. 252, no. 13. P. 4850–4856.
- Kornev A. F. et al., Nd:YAG lasers for ITER divertor Thomson scattering // *Fus. Eng. and Design*. 2019. Vol. 146. P. 1019–1022.
- Tapley B. D., Schutz B. E., Eanes R. J., Ries J. C., Watkins M. M. Lageos laser ranging contributions to geodynamics, geodesy, and orbital dynamics // *Contr. of sp. geod. to geodyn.: earth dyn.* 1993. Vol. 24. P. 147–174.
- Cheng M., Ries J. C., Tapley B. D. Variations of the Earth's figure axis from satellite laser ranging and GRACE // *J. Geophys. Res.: Sol. Earth*. 2011. Vol. 116, no. B1. P. 1–14.
- Plotkin H. H., Johnson T. S., Spadin P., Moyer J. Reflection of ruby laser radiation from Explorer XXII // *Proc. IEEE*. 1965. Vol. 53, no. 3. P. 301–302.
- Forrester, P., Hulme K. Laser rangefinders // *Opt. Quant. El.* 1981. Vol. 13, no. 4. P. 259–293.
- Degnan J. J. Satellite laser ranging: current status and future prospects // *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 1985. Vol. GE-23, no. 4. P. 398–413.
- Wilkinson M. et al. The next generation of satellite laser ranging systems // *J. Geod.* 2019. Vol. 93, no. 11. P. 2227–2247.
- Haifeng Z. et al., Overview of Satellite Laser Ranging for BeiDou Navigation Satellite System // *Aerosp. Ch.* 2020. Vol. 21, no. 4. P. 31–41.
- McGarry J. et al. NASA's satellite laser ranging systems for the twenty-first century // *J. Geod.* 2019. Vol. 93, no. 11. P. 2249–2262.
- Kornev A. F. et al. 0.43 J/100 ps Nd:YAG laser with adaptive compensation of thermally induced lens // *Opt. lett.* 2018. Vol. 43, no. 18. P. 4394–4397.
- Koehler W. Solid-state laser engineering. Vol. 1. 2013: Springer.

*Curtis J., Carroll J.* Autocorrelation systems for the measurement of picosecond pulses from injection lasers // Int. J. El. Th. Exp. 1986. Vol. 60, no. 1. P. 87–111.

*Mittermayer C., Steininger A.* On the determination of dynamic errors for rise time measurement with an oscillo-

scope // IEEE Trans. Instr. Meas. 1999. Vol. 48, no. 6. P. 1103–1107.

*Koval V. V., Kornev A. F., Rusov V. A.* Comparison of Pockels cell based on X-cut and Y-cut KTP crystals under intense picosecond radiation // IEEE Proc. International Conference Laser Optics. 2020. P. 1.