

Мощный двухчастотный пикосекундный лазер для высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии

© А. Ф. Корнев¹, Р. В. Балмашнов², В. В. Коваль²,
И. Г. Кучма¹, А. С. Давтян¹

¹ООО «Лазеры и оптические системы», г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбНИУ ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Задачи прецизионной дальнометрии в астрономии требуют повышения емкости сеансов измерений и уровня точности лунных лазерных дальномеров до значения ~ 1 мм. Для решения этих задач необходимы современные лазерные средства, обладающие короткой длительностью импульса, высокой частотой повторения и энергией в импульсе субджулевого диапазона и выше. Использование в спутниковой дальнометрии двухчастотных лазерных систем позволяет учитывать влияние атмосферы Земли на время распространения света до цели. Короткая длительность импульсов в лазерах такого типа приводит к необходимости решения проблем, связанных с лучевой стойкостью оптических покрытий и эффектом мелкомасштабной самофокусировки. Также в лазерах с длительностью импульсов менее 1 нс невозможно использование зеркал на основе вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна для компенсации термически наведенных искажений волнового фронта.

В настоящей работе представлены результаты разработки компактного двухчастотного лазера (1064 нм и 532 нм) с высокой стабильностью формы выходных импульсов. Лазер генерирует импульсы с энергией 0.5 Дж и длительностью 71 пс на длине волны 1064 нм и 0.3 Дж и 63 пс — на длине волны 532 нм соответственно. Частота повторения импульсов 200 Гц.

Ключевые слова: Nd:YAG лазер, твердотельный лазер, микрочип-лазер, регенеративный усилитель, удвоение частоты, локация Луны.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.49.43-51>

Введение

В настоящее время лунные лазерные дальнометры используются для решения задач, связанных с фундаментальными исследованиями гравитации, повышением точности определения координат пользователя в навигационных системах, а также для получения детальных изображений и определения параметров космических аппаратов и космического мусора [1]. Использование лазерных излучателей с длительностью импульсов в десятки пикосекунд и высокой как средней, так и пиковой мощностью выходного излучения позволит повысить точность определения дальности до космических объектов до значений порядка ~ 1 мм [2] и увеличить информационную емкость этих измерений. Использование для измерений длины волны, лежащей в видимой

зеленой области спектра (532 нм — для второй гармоники Nd:YAG лазеров), позволит уменьшить потери на поглощение излучения в атмосфере при измерении дальности [3]. Использование длины волны инфракрасного диапазона (1064 нм — для основной гармоники Nd:YAG лазеров) хоть и не оптимально с точки зрения потерь на поглощение в атмосфере, но является перспективным с точки зрения проведения измерений в дневное время и в полнолуние [4]. В перспективе при измерении дальности вариант одновременного использования двух длин волн [5, 6], после уточнения модели измерений [7, 8], дает учет влияния атмосферных искажений.

Статья посвящена разработке, сделанной в НИЦ «Лазерная физика» СПбНИУ ИТМО, — лазеру, который в дальнейшем будет использован в лазерном дальнометре Алтайского оптико-лазерного центра. Лазер отличается от аналогов [9–14] короткой длительностью импульса — 71 пс и 63 пс — и более высокой энергией — 0.5 Дж и 0.3 Дж — на двух длинах волн — 1064 нм и 532 нм — соответственно. Частота следования (200 Гц) на порядок выше по сравнению с аналогами. В качестве генератора второй гармоники в системе использовался кристалл LBO $17 \times 17 \times 7$ мм³, максимальная эффективность преобразования во вторую гармонику составила 64 %.

Лазер построен по схеме усиления излучения задающего генератора в двухпроходовом двухкаскадном усилителе мощности.

Задающий генератор

Задающий генератор (ЗГ) построен по схеме усиления излучения микро-чип-лазера в регенеративном усилителе (РУ).

Применение микро-чип-лазеров с пассивной модуляцией добротности на основе полупроводникового насыщающегося поглотителя является одним из способов получения импульсов пикосекундного диапазона. Короткая длительность импульсов при этом обеспечивается малой длиной резонатора, обычно не превышающей ~1 мм, и быстродействующим модулятором добротности, что в совокупности позволяет осуществить генерацию пикосекундных импульсов в одночастотном режиме в широком диапазоне частот следования импульсов (до ~1 МГц). Значительным преимуществом использования микро-чип-лазеров является высокая стабильность формы импульса, что является необходимым условием для прецизионной космической дальнометрии в режиме счета фотонов.

Для усиления импульсов микро-чип-лазера с энергией $\sim 10^{-9}$ Дж использовался РУ, принцип работы которого основан на усилении захваченного в лазерном резонаторе импульса, который остается там до тех пор, пока не извлечет большую часть энергии, накопленной в усиливающей среде. Захват и сброс импульсов осуществляется с помощью поляризатора и ячейки Поккельса, которая действует как полуволновая фазовая пластинка.

На рис. 1а приведена принципиальная оптическая схема ЗГ.

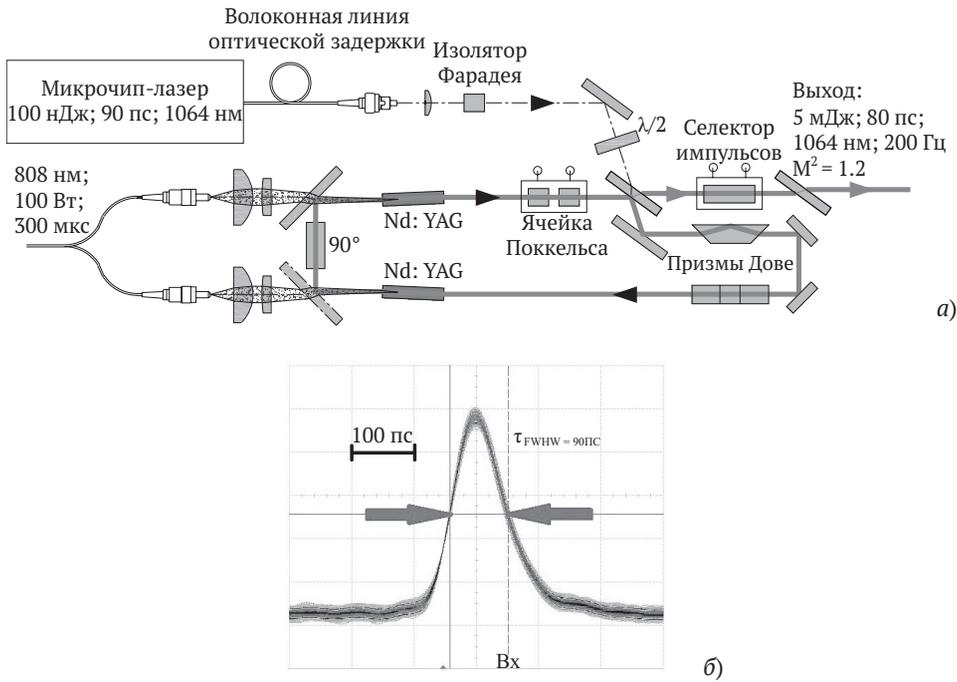


Рис. 1. а — принципиальная оптическая схема задающего генератора; б — осциллограмма выходного импульса регенеративного усилителя в режиме накопления (10^4 импульсов)

Излучение микрочип-лазера вводится в волоконную линию оптической задержки, представляющую собой одномодовое оптическое волокно с сохранением поляризации. Линия задержки с разветвителем используется для формирования оптического запуска драйвера ячейки Погккельса и задержки импульса микрочип-лазера на время срабатывания высоковольтного драйвера ячейки Погккельса.

Пучок микрочип-лазера после прохождения волоконной линии оптической задержки совмещен с основной модой (TEM_{00}) резонатора регенеративного усилителя с помощью однолинзовой формирующей оптической системы. Излучение вводится в резонатор регенеративного усилителя через изолятор Фарадея. Резонатор регенеративного усилителя представляет собой шестизеркальную схему с поляризационным выводом. Две ортогональные призмы Дове, установленные в резонаторе, обеспечивают низкую чувствительность к угловым разъюстировкам.

В регенеративном усилителе реализована торцевая накачка двух активных элементов Nd:YAG с использованием лазерных диодных модулей с длиной волны 808 нм с волоконным выводом излучения. Прокачанная зона формируется при помощи двухлинзовой телескопической системы. Суммарная импульсная мощность накачки составляет 100 Вт. Кварцевый вращатель, установленный между активными элементами, используется для пассивной компенсации термически наведенного двулучепреломления в активных элементах. Остаточное двулучепреломление и остаточное пропускание выходно-

го поляризатора приводят к наличию предимпульсов на выходе задающего генератора. Чтобы от них избавиться используется электрооптический селектор импульсов на выходе ЗГ.

Энергия импульса ЗГ составляет 5 мДж (среднеквадратическое отклонение — 0.2 %). Качество выходного излучения ЗГ $M^2 = 1.2$. Длительность импульса на выходе регенеративного усилителя составляет 80 пс. Форма импульса, полученная с использованием фотодиода Picometrix D-30 с полосой пропускания 15 ГГц и осциллографа Agilent DSO81204B с полосой пропускания 12 ГГц, приведена на рисунке 1б.

Выходной усилитель

Принципиальная оптическая схема выходного усилителя приведена на рис. 2. Выходной усилитель мощности лазерной системы представляет собой двухкаскадный двухпроходовой усилитель на активных элементах Nd:YAG $\varnothing 10 \times 140$ мм и $\varnothing 15 \times 140$ мм. Каждый активный элемент выходного усилителя накачивается тремя лазерными диодными матрицами с общей пиковой мощностью 19.5 кВт. Частота повторения импульсов накачки составляет 200 Гц при длительности импульса накачки 230 мкс.

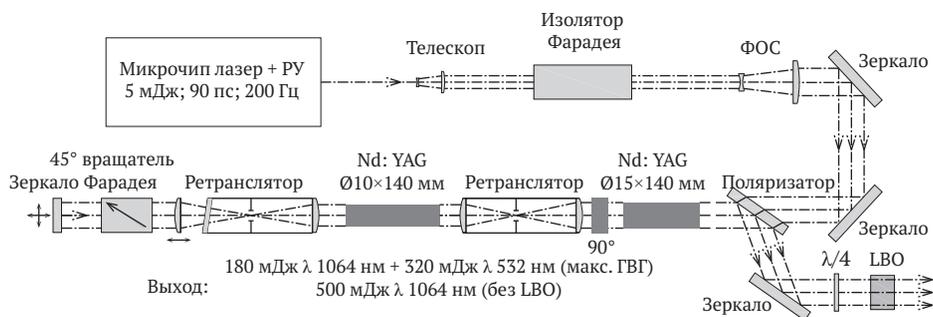


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема выходного усилителя

Излучение задающего генератора проходит формирующую оптическую систему, которая используется для телескопирования и коллимации пучка ЗГ, а также для совмещения центральной части Гауссова пучка ЗГ с апертурой выходного усилителя и обеспечения близкого к П-образному распределению усиливаемого излучения. Коллимированный пучок проходит через поляризатор и систему зеркал и направляется в двухпроходовой двухкаскадный выходной усилитель.

Одной из проблем, возникающих при разработке мощных твердотельных лазеров, является термически наведенное двулучепреломление [15]. Для компенсации термически наведенного двулучепреломления между каскадами усиления установлен 90° -градусный кварцевый вращатель. После активных элементов излучение проходит через 45° -градусный вращатель Фарадея, который также участвует в компенсации термически наведенного двулучепреломления и обеспечивает вывод излучения из усилителя. После первого прохода усилителя излучение отражается от глухого зеркала и второй раз проходит через активные элементы. На выход усилителя мощности излучение попадает

с плоскостью поляризации, повернутой на 90° относительно плоскости поляризации входного излучения ЗГ, что приводит к отражению усиленного излучения от поляризатора и его выводу из усилителя. Для защиты ЗГ от остаточной деполаризованной компоненты излучения используется изолятор Фарадея.

Высокая плотность энергии (более 1 Дж/см^2) излучения с пикосекундной длительностью может приводить к повреждению оптических элементов лазера. Чтобы уменьшить вероятность повреждения оптики и возникновения мелкомасштабной самофокусировки лазерного излучения, выходная энергия была ограничена значением 500 мДж.

Выходное излучение усилителя проходит четвертьволновую пластину, установленную перед генератором второй гармоники (ГВГ) для получения круговой поляризации. В качестве ГВГ использовался кристалл LBO (габариты $17 \times 17 \times 7 \text{ мм}^3$, ориентация: $\theta = 20.9^\circ$, $\varphi = 90^\circ$) со II типом фазового синхронизма. Выбор кристалла LBO обусловлен его высокой лучевой стойкостью и относительно высокой нелинейностью. В ГВГ происходит преобразование излучения 1064 нм с круговой поляризацией в излучение 532 нм с линейной поляризацией.

Для компенсации нестационарных искажений радиуса кривизны волнового фронта в схеме лазера используется адаптивный компенсатор термически наведенной линзы с анализатором на основе квадрантного фотодиода и астигматической линзы [16]. Исполнительным элементом компенсатора являются моторизованная линейная подвижка, на которую установлена линза одного из ретрансляторов. Чувствительность анализатора к изменению сферичности волнового фронта составляет $\lambda/100$ [17].

Экспериментальные результаты

Получены значения слабосигнального усиления 12.4 и 3.8 на проход в активных элементах $\varnothing 10 \times 140 \text{ мм}$ и $\varnothing 15 \times 140 \text{ мм}$, соответственно, при энергии импульсов накачки 4.5 Дж и их длительности 230 мкс. Технические решения,

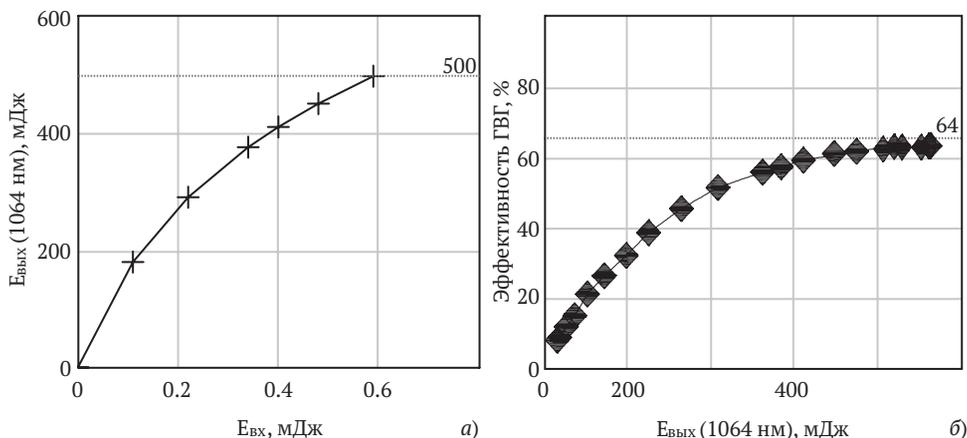


Рис. 3. а — зависимость выходной энергии излучения $E_{\text{вых}}$ с длиной волны 1064 нм от энергии входного сигнала $E_{\text{вх}}$, б — зависимость эффективности преобразования во вторую гармонику от падающей на кристалл энергии излучения с длиной волны 1064 нм

примененные при разработке рассмотренного лазера, позволяют получить выходную энергию лазерного излучения ~ 1 Дж в импульсе. Однако для обеспечения надежности и увеличения срока службы лазера, выходная энергия искусственно ограничена значением 500 мДж. Выходная энергия 500 мДж со среднеквадратичным отклонением 0.9 % на частоте следования импульсов 200 Гц была получена при уровне входного сигнала 0.6 мДж. Зависимость выходной энергии лазера от энергии входного сигнала показана на рис. 3.

Фокусные расстояния термически наведенных линз при максимальной накачке были равны 1.3 м и 2.9 м в активных элементах $\varnothing 10 \times 140$ мм и $\varnothing 15 \times 140$ мм соответственно. Компенсация двулучепреломления обеспечила значение энергии деполяризованной компоненты не более 2 % от общей выходной энергии.

Поперечное распределение интенсивности пучка в ближней зоне близко к П-образному (рис. 4а). Расходимость выходного излучения на длине волны 1064 нм составляет 0.13 мрад, что соответствует расходимости менее 1.5 дифракционного предела для выходного пучка $\varnothing 15$ мм. Распределение интенсивности пучка в дальней зоне приведено на рис. 4б.

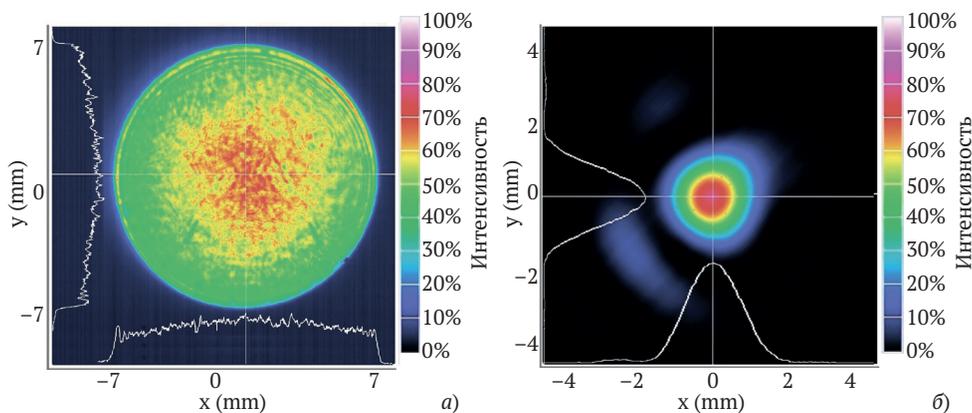


Рис. 4. Поперечное распределение интенсивности пучка: а — в ближней зоне; б — в дальней зоне, где x, y — ортогональные координаты в плоскости, перпендикулярной оси лазерного пучка, ось x — горизонтальная

Максимальная эффективность генерации второй гармоники составила 64 % (рис. 3б), при этом энергия излучения на длине волны 532 нм составила 318 мДж. При работе лазера в двухчастотном режиме доля излучения второй гармоники регулировалась в пределах от 5 % до 64 % от общей мощности путем изменения температуры кристалла ГВГ (рис. 5).

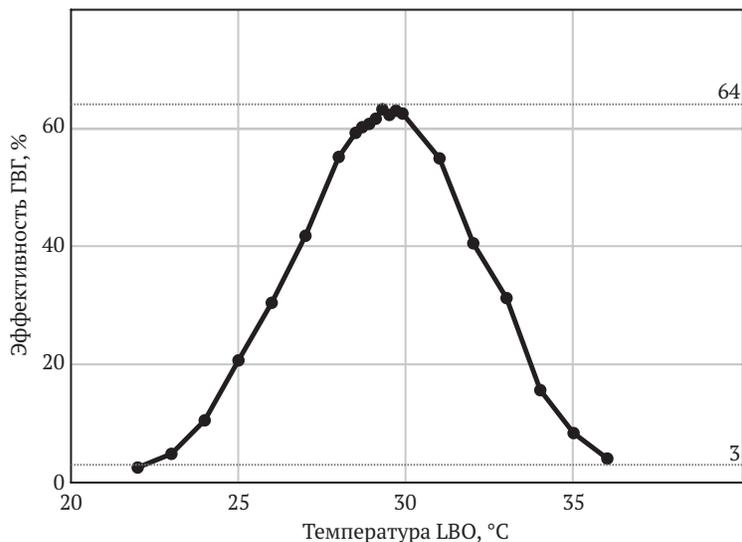


Рис. 5. Зависимость эффективности преобразования во вторую гармонику от температуры кристалла LBO

Габаритные размеры лазерного излучателя составляют $1100 \times 600 \times 215 \text{ мм}^3$. Внешний вид излучателя приведен на рис. 6.

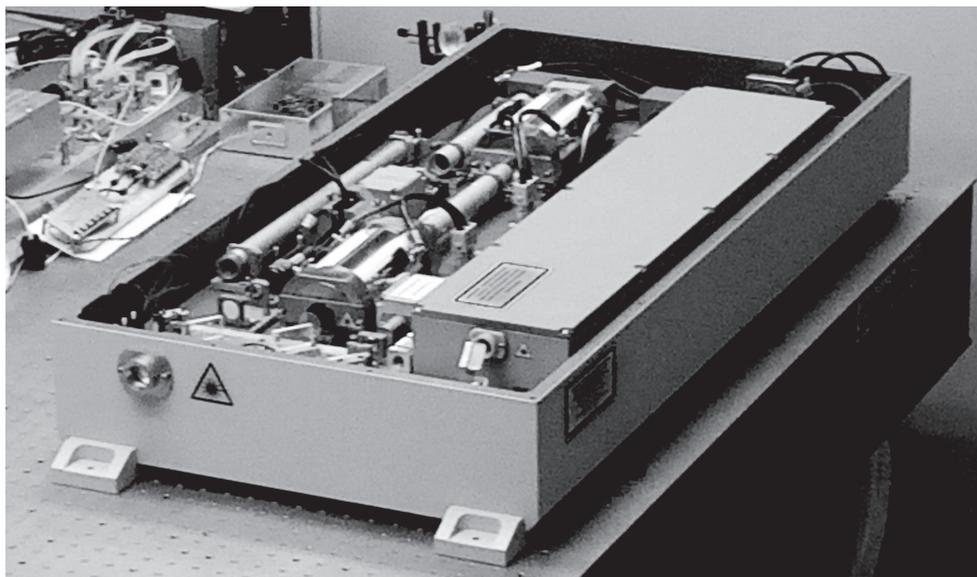


Рис. 6. Внешний вид излучателя

Заключение

Разработанный мощный пикосекундный лазер обладает высокой стабильностью формы импульса, высокой выходной энергией и высокой частотой следования импульсов. Выходная энергия лазера была искусственно ограничена на уровне 500 мДж для достижения высокого уровня надежности. Длительность импульса излучения на длине волны 1064 нм составила 71 пс, частота следования импульсов была равна 200 Гц. На длине волны 532 нм максимальная энергия импульсов составила 318 мДж при эффективности преобразования излучения во вторую гармонику 64 %, при этом длительность импульса излучения на длине волны 532 нм составила 63 пс. Среднеквадратическое отклонение выходной энергии — 0.9 % и 1.5 % для излучения с длиной волны 1064 нм и 532 нм соответственно. Расходимость выходного излучения на длине волны 1064 нм составила 0.13 мрад, что соответствует расходимости менее 1.5 дифракционного предела.

При работе лазера в двухчастотном режиме соотношение энергий излучения с длинами волн 1064 нм и 532 нм регулировалась изменением температуры кристалла ГВГ.

Разработанный двухчастотный лазер может использоваться для решения задач, связанных с фундаментальными исследованиями гравитации, повышением точности определения координат пользователя в навигационных системах, а также для получения детальных изображений и определения параметров космических аппаратов и космического мусора.

Литература

1. Гришин Е. А., Шаргородский В. Д. Методы и средства для получения оптических изображений космических объектов с Земли // Приборы и техника эксперимента. — М.: Наука, 1999. — №. 1. — С. 127.

2. Grechukhin I. A., Grishin E. A., Ivlev O. A., Kornev A. F., Mak A. A., Sadovnikov M. A., Shargorodskiy V. D. Russian lunar laser locator with millimeter accuracy // 2016 International Conference Laser Optics, LO 2016. — IEEE, 2016. — P. R63.

3. Толмачева Н. И., Шкляева Л. С. Космические методы экологического мониторинга. — Учебное пособие. — Пермь: Перм. унт, 2006. — 296 с.

4. Courde C., Torre J. M., Samain E., Martinot-Lagarde G., Aimar M., Albanese D., Exertier P., Fienga A., Mariey H., Metris G., Viot H., Viswanathan V. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station // Astronomy & Astrophysics. — 2017. — Vol. 602. — P. A90.

5. Prilepin M. T. Light-modulating method for determining the average index of refraction of air along a line // Trans., Institute of Geodesy, Aeronomy and Cartography. — URSS, 1957. — no. 114. — P. 127–130.

6. Bender P. L., Owens J. C. Correction of optical distance measurements for the fluctuating atmospheric index of refraction // Journal of geophysical research. — 1965. — Vol. 70, no. 10. — P. 2461–2462.

7. Abshire J. B., Gardner C. S. Atmospheric refractivity corrections in satellite laser ranging // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. — 1985. — Vol. GE-23, no. 4. — P. 414–425.

8. Wilkinson M., Schreiber U., Procházka I., Moore C., Degnan J., Kirchner G., Zhongping Z., Dunn P., Shargorodskiy V., Sadovnikov M., Courde C., Kunimori H. The next generation of satellite laser ranging systems // Journal of Geodesy. — 2018. — P. 1–21.

9. Buzelis R., Kosenko J., Murauskas E. Q-switched SBS-compressed Nd: YAG laser for satellite ranging // 11th International Workshop on Laser Ranging. — 1998. — P. 1–6.

10. *Murphy Jr. T. W., Strasburg J. D., Stubbs C. W., Adelberger E. G., Angle J.* The Apache Point Observatory Lunar Laser-Ranging Operation (APOLLO) // Proceedings of 12th International Workshop on Laser Ranging, Matera, Italy. — 2000. — P. 1–10.

11. *Murphy Jr. T. W., Adelberger E. G., Battat J. B. R., Carey L. N., Hoyle C. D., LeBlanc P., Michelsen E. L., Nordvedt K., Orin A. E., Strasburg J. D., Stubbs C. W., Swanson H. E., Williams E.* The Apache point observatory lunar laser-ranging operation: instrument description and first detections // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2008. — Vol. 120, no. 863. — P. 20.

12. *Courde C., Torre J. M., Samain E., Martinot-Lagarde G., Aymar M., Albanese D., Exertier P., Fienga A., Mariey H., Metris G., Viot H., Viswanathan V.* Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station // Astronomy & Astrophysics. — 2017. — Vol. 602. — P. A90.

13. *Noom D. W. E., Witte S., Morgenweg J., Altmann R. K., Eikema K. S. E.* High-energy, high-repetition-rate picosecond pulses from a quasi-CW diode-pumped Nd: YAG system // Optics letters. — 2013. — Vol. 38, no. 16. — P. 3021–3023.

14. *Su H., Peng Y., Chen J., Li Y., Wang P., Leng Y.* A High-Energy, 100 Hz, Picosecond Laser for OPCPA Pumping // Applied Sciences. — 2017. — Vol. 7, no. 10. — P. 997.

15. *Мезенов А. В., Сомс Л. Н., Степанов А. И.* Термооптика твердотельных лазеров. — Л.: Машиностроение, 1986. — 197 с.

16. *Balmashnov R. V., Kornev A. F., Kuchma I. G.* Adaptive compensator of thermally induced lens with analyzer based on quadrant photodiode // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). — IEEE, 2018. — P. 189–189.

17. *Kornev A. F., Balmashnov R. V., Kuchma I. G., Davtian A. S., Oborotov D. O.* 0.43 J/100 ps Nd:YAG laser with adaptive compensation of thermally induced lens // Optics letters. — 2018. — Vol. 43, no. 18. — C. 4394–4397.

High-Energy Two-Colour Picosecond Laser for Precision Satellite Laser Ranging

A. F. Kornev, R. V. Balmashnov, V. V. Koval, I. G. Kuchma, A. S. Davtian

The tasks of lunar laser ranging in astronomy require an increased capacity of observation sessions and about 1 mm measurement accuracy. These improvements imply the necessity to use modern laser sources with short pulse duration, high pulse repetition rate and the sub-joule (or higher) output pulse energy range. Using two-colour laser systems in the satellite ranging makes it possible to take into account the influence of the Earth's atmosphere on the time of light propagation to the aim. The short pulse duration in the lasers of this type causes the necessity of solving tasks associated with the low level damage threshold of optical coatings and the effect of small-scale self-focusing. Also, it is impossible to use the SBS-mirrors to compensate for thermally induced distortions of the wavefront in the lasers with less than 1 ns pulse duration. This paper presents the development report about the compact two-colour (1064 nm and 532 nm) laser with a very stable output pulse shape. The laser generates pulses with the energy of 0.5 J and pulse duration of 71 ps at the 1064 nm wavelength. The 0.3 J and 63 ps pulses are generated at the 532 nm wavelength respectively. The pulse repetition rate of the laser is 200 Hz.

Keywords: Nd:YAG laser, solid-state laser, microchip laser, regenerative amplifier, frequency doubling, Lunar laser ranging.