

## Лазерный источник пикосекундных импульсов для прецизионной дальнометрии, локации и геопозиционирования

© А. Ф. Корнев<sup>1,2</sup>, А. С. Давтян<sup>1,2</sup>, Р. В. Балмашнов<sup>2</sup>,  
Ю. В. Кацев<sup>1,2</sup>, В. П. Покровский<sup>1,2</sup>, А. С. Ковяров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ЛОС», г. Санкт-Петербург, Россия

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

Для решения задач по проведению измерений параметров орбит космических аппаратов и дальности до естественных и искусственных спутников требуется источник мощного лазерного излучения с субнаносекундной длительностью импульса. В данной работе представлены результаты разработки Nd:YAG лазера, отвечающего заданным требованиям. В состав лазера входит микроchip лазер, регенеративный усилитель и выходной усилитель. Выходная энергия лазера составляет 0.4 Дж при длительности импульса 100 пс на длине волны 1064 нм и 0.3 Дж с длительностью 90 пс на длине волны 532 нм.

**Ключевые слова:** Nd:YAG лазер, микроchip лазер, регенеративный усилитель, удвоение частоты, локация Луны, усилитель мощности.

### Введение

К разрабатываемому источнику лазерного излучения для Лунного локатора [1] были предъявлены следующие требования:

- длина волны излучения — 532 нм;
- энергия импульса — 0.25 Дж;
- длительность импульса — не более 100 пс;
- частота следования импульсов — не менее 200 Гц;
- расходимость излучения — близкая к дифракционной.

Сложность реализации описываемого источника излучения заключается в том, что одновременно необходимо получить высокую пиковую и среднюю мощность излучения (3 ГВт и 60 Вт соответственно) при длине волны 532 нм с близкой к дифракционной расходимостью.

В известных нам литературных источниках высокая энергия пикосекундных импульсов достигается в лазерах на неодимовом стекле с малой частотой следования импульсов и низкой средней мощностью [2]. В свою очередь в лазерах на кристаллах выходная энергия, при средней мощности, сравнимой с

выходной мощностью разрабатываемого лазера, не превышает нескольких мДж на длине волны 1064 нм [3–7].

Для решения поставленной задачи был разработан твердотельный Nd:YAG лазер с удвоением частоты построенный по схеме задающий генератор (ЗГ) – регенеративный усилитель (РУ) – выходной усилитель (ВУ).

Генератор представляет собой микрочип-лазер (МЧ) с длиной резонатора около 1 мм, что позволяет получить импульсы генерации длительностью 100 пс. МЧ с пассивной модуляцией добротности обеспечивает стабильную колоколообразную форму спектрально ограниченного лазерного импульса с энергией 100 нДж. Предварительное усиление импульса МЧ до энергии 5 мДж осуществляется в РУ с оптической синхронизацией. ВУ построен по двухпроходовой схеме с компенсацией термически наведенных aberrаций с использованием известных способов подавления самофокусировки излучения.

Лазер основан на использовании полупроводниковой накачки и крупногабаритных Nd:YAG активных элементов в выходном усилителе.

### Оптическая схема и принцип работы каскадов МЧ-РУ

На рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая принцип работы каскадов МЧ-РУ. МЧ основан на изделии компании ВАТОР GmbH, включающем в себя Nd:YVO активный элемент (АЭ), полупроводниковый пассивный затвор (SESAM) и зеркала резонатора. Накачка микрочипа осуществляется лазерным диодом с волоконным выводом излучения. Мощность накачки составляет 0.3 Вт с длительностью импульса 30 мкс. Излучение накачки фокусируется на торец микрочип лазера в пятно диаметром 40 мкм. Выходная энергия микрочип лазера составляет 100 нДж, длительность импульса 100 пс.

При точности поддержания температуры МЧ  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  стабильность длины волны не хуже  $\pm 10^{-3}$  нм ( $< 5\%$  от спектральной ширины импульса). На рис. 3

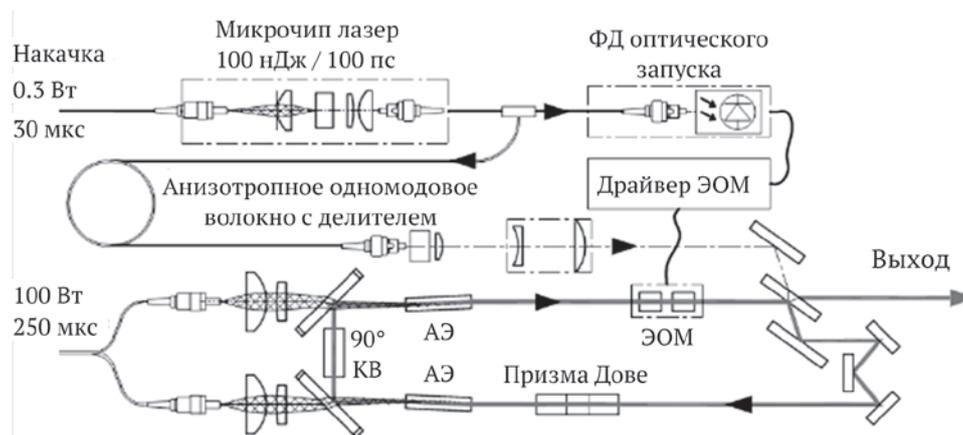


Рис. 1. Принципиальная схема «МЧ-РУ»

представлена осциллограмма усиленного в РУ импульса, снятая в режиме накопления  $10^4$  импульсов.

Алгоритм работы регенеративного усилителя заключается в том, что в низкодобротный (с высокими потерями) резонатор вводится излучение. В этот момент оптический ключ — электрооптический модулятор (ЭОМ) добротности — переключает поляризацию в состояние собственной поляризации резонатора. С этого момента введенный импульс начинает свое усиление с каждым обходом резонатора. Когда энергия излучения внутри резонатора достигает максимального (или достаточного) значения, ЭОМ снова переключает свое состояние, и излучение выводится из резонатора.

Джиттер (нестабильность временного положения) импульса генерации микрочип лазера относительно синхроимпульса составляет  $\pm 50$  нс, а временной масштаб синхронизации работы РУ (допустимый джиттер системы синхронизации) не превышает 0.5 нс. Для осуществления синхронизации РУ использован оптический запуск РУ. Для этого излучение МЧ с помощью системы линз вводится в волокно с оптическим делителем, где разделяется на 2 канала. Излучение первого канала попадает на фотоприемник, который осуществляет запуск драйвера ЭОМ РУ. Второй канал волоконно-оптического делителя обеспечивает оптическую задержку импульса МЧ, которая компенсирует задержку запуска драйвера ЭОМ РУ. Со второго канала волоконно-оптического делителя излучение микрочип лазера попадает на схему формирования и оптической изоляции, после чего вводится в резонатор регенеративного усилителя.

Регенеративный усилитель построен по кольцевой схеме с двумя активными элементами с пассивной компенсацией термически наведенного двулучепреломления. Накачка АЭ осуществляется с помощью двух сумматоров лазерных диодов с волоконным выводом излучения мощностью 50 Вт. Длительность накачки 250 мкс.

Системы из двух линз строят увеличенное изображение торцов волокон накачки в активных элементах. Диаметр пятна накачки в АЭ составляет 1 мм. Семи-зеркальная схема резонатора с призмой Дове обеспечивает малую чувствительность резонатора к разъюстировкам.

### **Выходные характеристики РУ**

Зависимость, приведенная на рис. 2, показывает, как меняется энергия импульса по мере обходов резонатора регенеративного усилителя. Экспериментальные результаты (показаны точками) хорошо согласуются с расчетной зависимостью (сплошная линия). Выходная энергия регенеративного усилителя на длине волны 1064 нм достигает 5.3 мДж, среднеквадратичное отклонение составляет 0.3 %.

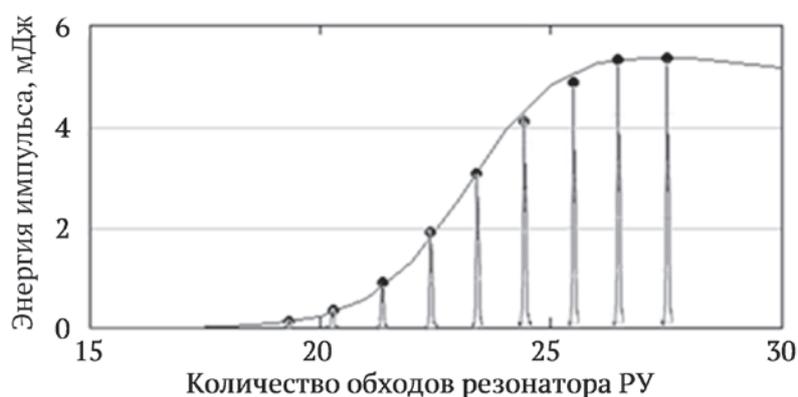


Рис. 2. Зависимость энергии выходного импульса (на длине волны 1064 нм) от количества обходов резонатора РУ

Импульс генерации имеет стабильную колоколообразную форму. Длительность импульса генерации составляет 100 пс, среднеквадратичное отклонение не превышает 1.5 %. На рис. 3 представлена осциллограмма усиленного импульса «МЧ-РУ», из которой видно, что вероятность генерации импульса с отличной от средней формы крайне мала.

Был проведен эксперимент по удвоению частоты излучения РУ в кристалле LBO. Выходная энергия на длине волны 532 нм составила 2.5 мДж (СКО 0.5 %), длительность импульса — 90 пс (СКО 2 %), качество пучка близкое к дифракционному. Результаты эксперимента показали, что такие импульсы могут применяться для решения задач ГЛОНАСС, КВНО, ЭВО, при измерении наклонной дальности до космических аппаратов, оснащенных ретрорефлекторами, с высотой орбиты до 25 000 км.

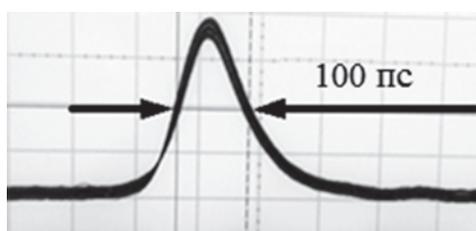


Рис. 3. Осциллограмма усиленного импульса «МЧ-РУ» в режиме накопления 10 000 импульсов

### Оптическая схема выходного усилителя и экспериментальные результаты

Для достижения требуемой для лунной локации выходной энергии был использован дополнительный каскад усиления на крупногабаритных АЭ — ВУ [8].

Выходной двухпроходовой усилитель (рис. 4) основан на двух квантронах с активными элементами Nd:YAG  $\varnothing 10 \times 140$  (мм). Оптическая схема ВУ представлена на рис. 4. Каждый АЭ накачивается тремя лазерными диодными матрицами с длиной волны 807 нм и пиковой мощностью 6 кВт при длительности импульса накачки — 240 мкс. Поляризованное излучение усиленного в РУ импульса МЧ проходит формирующую оптическую систему, поляризатор и попадает в усилитель. Для пассивной компенсации термически наведенного двулучепреломления использовались установленные между квантронами ретранслятор и  $90^\circ$  кварцевый вращатель [8]. Вывод излучения реализован с помощью поляризационной развязки на основе ротатора Фарадея и поляризатора. Для защиты регенеративного усилителя от деполяризованной компоненты дополнительно использовался изолятор Фарадея.

Чтобы уменьшить вероятность повреждения оптических покрытий и мелкомасштабной самофокусировки лазерного излучения были реализованы следующие технические решения:

- двукратный запас плотности энергии на всех оптических элементах;
- круговая поляризация в активных элементах;
- внесение геометрической расходимости в усиливаемое излучение;
- пространственная фильтрация излучения.

Совокупность примененных технических решений позволила создать лазер с высокой выходной энергией пикосекундных импульсов.

Полученное значение коэффициента слабосигнального усиления в каждом квантроне  $\approx 7$ . Это значение соответствует запасенной энергии 0.9 Дж в каждом активном элементе. На рис. 5 приведена зависимость выходной энергии усилителя от запасенной в квантронах энергии.

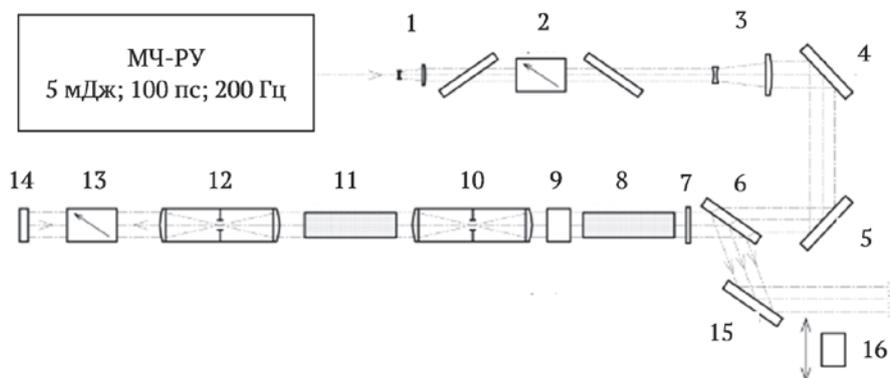


Рис. 4. Принципиальная схема усилителя пикосекундных импульсов  
 1, 3 — телескоп; 2 — изолятор Фарадея; 4, 5, 14, 15 — глухие зеркала;  
 6 — поляризатор; 7 — четвертьволновая пластина; 8, 11 — Nd:YAG активные элементы;  
 9 — кварцевый вращатель поляризации;  
 10, 12 — вакуумированные ретрансляторы; 13 — ротатор Фарадея;  
 16 — генератор второй гармоники (кристалл LBO)

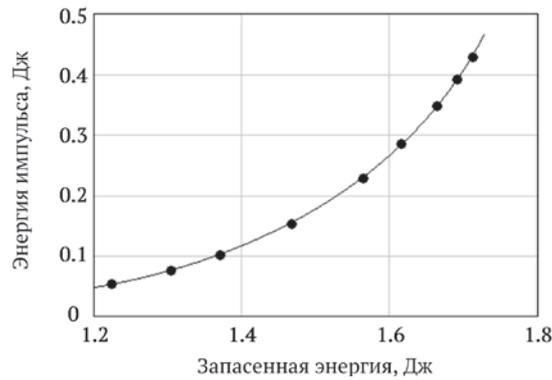


Рис. 5. Зависимость выходной энергии усилителя от запасенной в активных элементах энергии

Для решения задачи локации Луны выходное излучение было преобразовано во вторую гармонику в кристалле LBO с эффективностью 72 %. Энергия импульсов с длительностью 90 пс на длине волны 532 нм составила 0.3 Дж на частоте повторения 200 Гц.

### Заключение

1. Показана высокая стабильность длительности и формы импульса микрочип лазера с пассивным затвором. Длительность импульса генерации составляет 100 пс.

2. Реализован РУ с оптической синхронизацией. РУ основан на двух активных элементах с продольной лазерной диодной накачкой двумя модулями с пиковой мощностью 50 Вт и кондуктивным охлаждением. Выходная энергия РУ на длине волны 1064 нм составляет 5.3 мДж, среднеквадратичное отклонение — 0.3 %. Длительность импульса генерации 100 пс. Качество излучения близкое к дифракционному пределу.

Показано, что излучение может быть преобразовано во вторую гармонику с эффективностью около 50 %.

3. ВУ выполнен на основе двух крупногабаритных Nd:YAG АЭ с лазерной диодной накачкой. Усилитель построен по двухпроходовой схеме с компенсацией термооптических эффектов. Достигнута выходная энергия 0.4 Дж при частоте следования импульсов 200 Гц. Расходимость лазерного излучения < 1.5 дифракционного предела. Выходная энергия на длине волны 532 нм составляет 0.3 Дж. Эффективность преобразования излучения во вторую гармонику — 72 %.

### Литература

1. 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 // International Conference Laser Optics, 2016. — P. R63.

2. Bagnoud V., Luce J., Videau L., Rouyer C. Diode-pumped regenerative amplifier delivering 100-mJ single-mode laser pulses // *Optics Letters*. — Washington, D.C.: OSA Publishing, 2001 — Vol. 26, Issue 6. — P. 337–339.

3. McDonagh L., Wallenstein R., Nebel A. 111W, 110 MHz repetition-rate, passively mode-locked TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> master oscillator power amplifier pumped at 888 nm // *Optics Letters*. — Washington, D.C.: OSA Publishing, 2007 — Vol. 32, Issue 10. — P. 1259–1261.

4. Peng Runwu, Guo Lin, Zhang Xiaofu, Li Fangqin, Cui Qianjin, Bo Yong, Peng Qinjun, Cui Dafu, Xu Zuyan. Picosecond laser amplification system with 93 W high average power // *Optics Communications*. — Amsterdam: Elsevier, 2008. — Vol. 281, Issue 10. — P. 2879–2882.

5. Nawata K., Okida M., Furuki K., Miyamoto K., and Omatsu T. Sub-100 W picosecond output from a phase-conjugate Nd:YVO<sub>4</sub> bounce amplifier, *Optics Express*. — 2009. — Vol. 17, Issue 23 — P. 20816–20823.

6. Xu Liu, Zhang Hengli, Mao Yefei, Yan Ying, Fan Zhongwei, Xin Jianguo. High-average-power and high-beam-quality Innoslab picosecond laser amplifier // *Applied Optics*. — Washington, D.C.: OSA Publishing, 2012. — Vol. 51, Issue 27. — P. 6669–6672.

7. Turi L., Juhasz T. High-power longitudinally end-diode-pumped Nd:YLF regenerative amplifier // *Optics Letters*. — Washington, D.C.: OSA Publishing, 1995 — Vol. 20, Issue 2. — P. 154–156.

8. Balmashnov R. V., Katsev Y. V., Kornev A. F., Kuchma I. G., Oborotov D. O. 100 ps 360 mJ 200 Hz Nd:YAG laser for the lunar laser ranging // *International Conference Laser Optics, LO 2016*. — 2016. — P. R64.

9. Мезенов А. В. Термооптика твердотельных лазеров / А. В. Мезенов, Л. Н. Сомс, А. И. Степанов. — Ленинград: Машиностроение, 1986. — 197 с.

## **A Laser Source of Picosecond Pulses for High Precision Ranging and Positioning**

**A. F. Kornev, A. S. Davtian, R. V. Balmashnov, Y. V. Katsev,  
V. P. Pokrovskiy, A. S. Kovyarov**

A powerful laser source of radiation with sub-ns pulse duration is required to solve problems of measuring spacecraft orbit parameters and finding exact distances to natural and artificial satellites. The paper presents the Nd:YAG laser which is developed to meet the specified requirements. A “master oscillator and power amplifier” scheme has been used for this laser. The microchip laser with the regenerative amplifier act as a master oscillator with the 5 mJ output pulsed radiation. The repetition rate is about 1000 Hz. Our master oscillator can be used when it is necessary to meet the satellite laser ranging requirements. We obtain 2.5 mJ pulses at the 532 nm wavelength with 50 % conversion efficiency. Lunar ranging requires much more of pulse energy, therefore the two-pass Nd:YAG power amplifier is set. Its output laser energy is 0.4 J with 100 ps pulse duration at the 1064 nm wavelength and 0.3 J with 90 ps pulse duration at the 532 nm wavelength.

**Keywords:** Nd:YAG laser, microchip laser, regenerative amplifier, second harmonic generation, p ositioning of the Moon, power amplifier.