

# Трёхволновая лазерная система на АИГ: $\text{Nd}^{3+}$ для лидарного зондирования морских акваторий

А.И. ЛЯШЕНКО<sup>1</sup>, Ю.А. ГОЛЬДИН<sup>2</sup>, Е.М. ВОЛОДИНА<sup>1</sup>, В.А. КУКУШКИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

E-mail: alexs1407@yandex.ru, goldin@ocean.ru

## Аннотация

Представлены результаты измерений временных параметров моноимпульсов излучений в УФ, видимом и ИК спектральных диапазонах модернизированного *RGB*-лазера с внутрирезонаторным параметрическим генератором света. Предложено преобразовать модернизированный *RGB*-лазер в трёхволновую многофункциональную лазерную систему с генерацией более коротких и более мощных моноимпульсов излучений 532 и 452 нм с их оперативным переключением. Лазерная система предназначена для работы в составе морского авиационного радиометрического лидара и имеет дополнительный канал безопасного для зрения излучения с длиной волны 1572 нм для контроля высоты полёта над уровнем моря.

**Ключевые слова:** радиометрический лидар, зондирование акваторий, *RGB*-лазер, многофункциональная лазерная система на АИГ:  $\text{Nd}^{3+}$ , параметрический генератор света.

## 1. Введение

Радиометрические лидары применяются для исследования морских акваторий, в том числе для обнаружения и регистрации характеристик слоёв повышенного светорассеяния, внутренних волн и различного рода неоднородностей в толще воды [1–3]. В качестве источника зондирующего излучения в морских радиометрических лидарах обычно используются моноимпульсные лазеры на АИГ:  $\text{Nd}^{3+}$  с преобразованием излучения во вторую гармонику (длина волны излучения 532 нм) или лазеры на АИ:  $\text{Nd}^{3+}$  с преобразованием излучения во вторую гармонику (длина волны 540 нм). Зондирующие моноимпульсы должны иметь достаточно высокую энергию (десятки мДж), короткую длительность по уровню 0,5 ( $\tau_{0,5}$ ) и ко-

роткую длительность фронта ( $\tau_f$ ) по уровню 0,1–0,9 амплитуды (несколько нс), определяющие пространственное разрешение по глубине [4, 5]. Выбор длины волны излучения определяется спектральной зависимостью показателя ослабления света морской воды. В относительно мутных прибрежных водах минимальные значения показателя ослабления находятся в области длин волн 530–550 нм. В чистых водах открытых районов мирового океана область минимальных значений соответствует длинам волн 450–470 нм [6, 7]. Для этих вод длина волны излучения 532 нм не является оптимальной. Смещение длины волны зондирующего излучения в синюю область позволяет увеличить в таких водах глубину лидарного зондирования. При этом в мутных водах максимальная глубина зондирования уменьшится. Поэтому практический интерес представляет создание универсального лидара, позволяющего выполнять зондирование попеременно на двух длинах волн с оперативным переключением длины волны зондирующего излучения.

Анализ литературы показал, что лазерные источники, удовлетворяющие всем требованиям поставленной задачи, отсутствуют. Так, известные твердотельные лазеры с генерацией высших гармоник в синей области спектра излучают моноимпульсы с низкой энергией и большой длительностью [8]. Особый интерес представляет *RGB*-лазер на основе моноимпульсного лазера на АИГ:  $\text{Nd}^{3+}$  с параметрическим генератором света (ПГС), генерирующий излучение в красной, зелёной и синей областях спектра. Этот лазер, в частности, генерирует короткие моноимпульсы излучения (~ 3 нс) на длине волны 452 нм. Однако энергии этих моноимпульсов недостаточно для устойчивого приёма лидарных эхо-сигналов вследствие невозможности одновременно оптимизировать по энергии моноимпуль-

сы излучения накачки ПГС и моноимпульсы излучения сигнальной длины волны ПГС [9, 10].

При проведении лидарного зондирования с борта авианосителя необходимо знать его высоту над поверхностью воды непосредственно в момент зондирования. В ряде систем для определения высоты используется отдельный ИК канал. Излучение на длине волны 1064 нм направляется в лидар. Приёмная система регистрирует зеркально отражённое от поверхности воды излучение. Излучение на этой длине волны невидимо, но опасно для зрения. Целесообразно сдвинуть рабочую длину волны ИК канала в безопасную область (длины волн более 1,5 мкм). Поэтому получение моноимпульсов излучения в безопасной области спектра ещё одна важная задача при создании лазерной системы для авиационного лидара.

В работе обоснованы возможности создания такой лазерной системы на основе модернизированного *RGB*-лазера с ПГС, генерирующей мощные и короткие моноимпульсы излучений на длинах волн 532 и 452 нм с их оперативным переключением, а также моноимпульсы безопасного для зрения излучения на длине волны 1572 нм.

## 2. Моноимпульсные твердотельные лазеры с внутрирезонаторной параметрической генерацией

ПГС с внешней моноимпульсной лазерной накачкой подробно описаны в [11]. В этой работе отмечены основные особенности расчётных осциллограмм моноимпульсов накачки на входе и на выходе резонатора ПГС, а также осциллограмм импульсов субгармоники для случая вырожденного режима, когда длины сигнальной и холостой волн совпадают. Моноимпульсы субгармоники развиваются через определённое время после начала моноимпульса излучения накачки. По мере развития моноимпульса субгармоники происходит падение мощности моноимпульса накачки на выходе резонатора ПГС. При этом длительность моноимпульса накачки уменьшается, а моноимпульс излучения параметрической генерации (субгармоники) быстро нарастает и медленно спадает. Следует также отметить, что длительность фронта и длительность моноимпульса суб-

гармоники существенно меньше, чем у моноимпульса излучения накачки на входе в ПГС. Рассмотренный процесс параметрической генерации проходил в рамках схемы: лазер – ПГС. Схема лазер – ПГС имеет целый ряд недостатков. Чтобы избежать попадания излучения, отражённого от резонатора ПГС, в резонатор лазера накачки, резонатор ПГС приходится удалять на достаточно большое от лазера расстояние и отклонять его оптическую ось от направления пучка лазерной накачки. Это приводит к искажениям пространственной структуры излучения ПГС и падению коэффициента преобразования излучения накачки в излучение ПГС.

Схема с внутррезонаторной параметрической генерацией избавлена от указанных недостатков, хотя и не позволяет достигать больших значений энергии моноимпульсов излучения параметрической генерации. Зато благодаря высокой эффективности этой оптической схемы возможно достичь больших частот (до 100 Гц) повторения моноимпульсов [12]. При этом моноимпульсное излучение накачки может выводиться из резонатора при отражении от пластины-поляризатора, а излучение сигнальной длины волны выводится через параметрическое зеркало (глухое для волны накачки и частично прозрачное для сигнальной волны). После сведения с помощью поворотных зеркал этих двух излучений в один канал возникает возможность генерации высших гармоник и суммарных частот в соответствующих нелинейных элементах, расположенных друг за другом. Так, созданный по этой схеме RGB-лазер на основе моноимпульсного лазера на АИГ: Nd<sup>3+</sup> с ПГС генерирует моноимпульсы в красной, зелёной и синей областях спектра [10]. При генерации высших гармоник из-

лучения или суммарных частот временные параметры моноимпульсов  $\tau_{0,5}$  и  $\tau_{\phi}$  излучений с новыми длинами волн укорачиваются вследствие нелинейности процесса.

RGB-лазер может работать в трёх различных режимах. В режиме № 1 электрооптическое зеркало, образованное глухим зеркалом, электрооптическим элементом и пластиной-поляризатором, максимально прозрачное, а ПГС находится ниже порога генерации, вследствие чего из резонатора лазера выводится только излучение накачки 1064 нм при отражении от пластины-поляризатора с последующей генерацией второй гармоники в нелинейном элементе.

В режиме № 2 электрооптическое зеркало за счёт уменьшения коэффициента пропускания обеспечивает условие для генерации ПГС, излучение которого выводится из резонатора через частично прозрачное для сигнальной волны зеркало, при этом излучение волны накачки отражается от пластины-поляризатора со сведением в общий канал с излучением ПГС с последующей генерацией в нелинейных элементах моноимпульсов излучений на длинах волн второй гармоники 532 нм и суммарных частот 635 и 452 нм.

В режиме № 3 электрооптическое зеркало соответствует глухому зеркалу, при этом из резонатора выводится только излучение сигнальной волны ПГС 1572 нм.

Переключение режимов осуществляется за счёт изменения коэффициента пропускания электрооптического зеркала лазера накачки путём управления амплитудой импульса высоковольтного напряжения на электродах электрооптического элемента. Переход из одного режима в другой сопровождается изменениями энергетических и временных параметров

моноимпульсов излучения на каждой длине волны.

В процессе создания трёхволновой многофункциональной лазерной системы был выполнен первый этап модернизации RGB-лазера. Первоначальная модернизация RGB-лазера была проведена следующим образом. В дополнительно установленном нелинейном элементе из кристалла LBO ( $\theta=20^\circ$ ,  $\phi=90^\circ$ ) была получена генерация второй гармоники излучения сигнальной волны  $\lambda_{c2}=786$  нм [13]. На выходе RGB-лазера также было удалено отражающее ИК излучение зеркало. После модернизации RGB-лазер преобразовался в лазерную систему IRGB-LS, на выходе которой присутствует излучение на четырёх длинах волн в видимом диапазоне (786, 635, 532 и 452 нм) и на двух длинах волн в ИК диапазоне (1572 и 1064 нм).

### 3. Временные параметры моноимпульсов лазерной системы IRGB-LS

Для измерения временных параметров моноимпульсов излучения лазерной системы IRGB-LS использовались фотоприёмные устройства (ФПУ) Thorlabs DET08CL(M) InGaAs Biased Detector и ФПУ на основе лавинного фотодиода ЛФД-2, а также осциллографы Tektronix TDS2012 (100 МГц) и TELEDYNE LECROY Waverunner 8254R (2,5 ГГц).

При измерении временных параметров моноимпульсов излучения на каждой длине волны перед попаданием в ФПУ излучение селективировалось с помощью изготовленных из стекла марки КУ-1 дисперсионных призм Пеллин-Брока и светофильтров. Для генерации третьей гармоники на длине волны 355 нм на выходе системы был временно установлен нелинейный элемент из кристалла LBO ( $\theta=42,2^\circ$ ,  $\phi=90^\circ$ ).

С помощью осциллографа LECROY было установлено, что в режиме № 2 результаты измерений длительностей по уровню 0,5 и длительностей фронта отличаются незначительно при переходе от одного фотоприёмника к другому. Наиболее короткие длительности моноимпульсов были получены на длине волны 452 нм (рис. 1).

Результаты измерений временных параметров моноимпульсов излучений, полученные в режимах № 1 и № 2 с помощью ФПУ на основе ЛФД-2

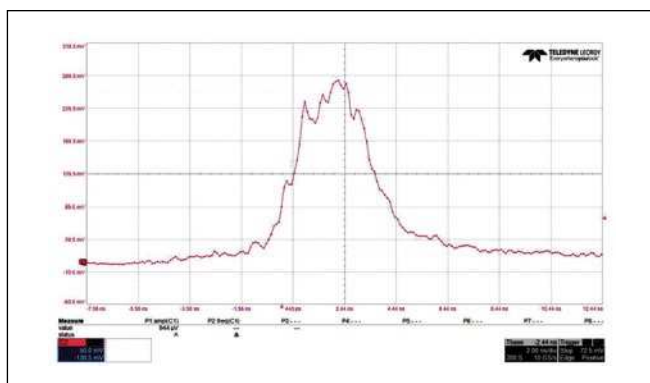


Рис. 1. Осциллограмма моноимпульса излучения с 452 нм, полученная в режиме № 2 с помощью ФПУ Thorlabs DET08CL(M) и осциллографа LECROY

и осциллографа *LECROY*, представлены в табл. 1.

Из данных измерений следует, что при переходе лазера из классического режима № 1 в режим № 2 значения временных параметров  $\tau_{0,5}$  и  $\tau_{\phi}$  для излучений на всех длинах волн существенно сокращаются за счёт перекачки спада моноимпульса волны накачки в моноимпульс излучения ПГС. Следует отметить, что в режиме № 2 при генерации третьей гармоники 355 нм и суммарной частоты 452 нм зафиксировано аномальное для моноимпульсов излучения соотношение между длительностями  $\tau_{0,5}$  и  $\tau_{\phi}$ , а именно  $\tau_{0,5} < \tau_{\phi}$ .

#### 4. Трёхволновая многофункциональная лазерная система *IGB-MLS*

Как следует из данных, приведённых в разделах 2 и 3, при переходе из режима № 1 в режим 2 *RGB*-лазера длительности временных параметров моноимпульсов излучения на всех длинах волн существенно сокращаются. При этом *RGB*-лазер работает в режиме, неоптимальном по энергии моноимпульсов излучения на длинах волн 1064 и 1572 нм. Модернизация *RGB*-лазера заключалась в установке нелинейного элемента из *LBO* для генерации второй гармоники излучения с 1572 нм и удалении выходного селективирующего зеркала, пропускающего излучение только видимого диапазона. Таким образом, *RGB*-лазер был преобразован в лазерную систему *IRGB-LS*, генерирующую моноимпульсы излучения в видимом (635, 532 и 452 нм) и в ближнем ИК (1572, 1064 и 786 нм) диапазонах.

Поскольку суммарная частота 452 нм генерируется при взаимодействии суммарной частоты 635 нм и ослабленной сигнальной волны 1572 нм, то синее излучение на длине волны 452 нм отличается наиболее низким уровнем мощности. Для повышения мощности синего излучения следует увеличить мощность излучений сигнальной волны и волны накачки. Для увеличения мощности сигнальной волны необходимо перевести лазерную систему в режим работы № 3. Так как при этом выходная мощность излучения накачки достигает своего минимального значения, необходимо его значительно усилить. Для этого в оптический тракт выходного излучения

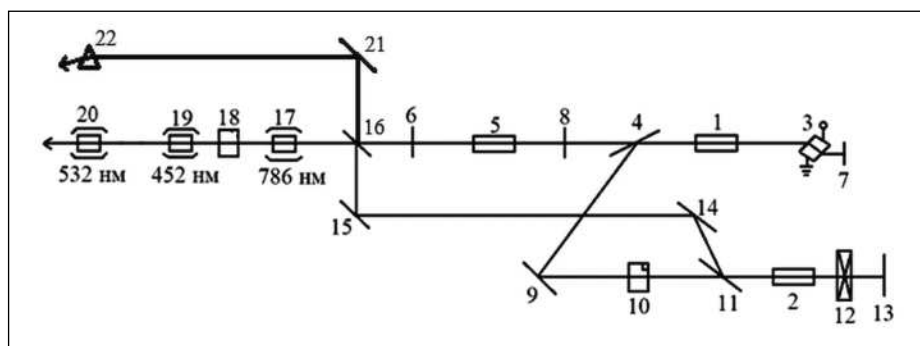


Рис. 2. Оптическая схема лазерной системы *IRGB-MLS*, где 1 и 2 – активный элемент АИГ:  $\text{Nd}^{3+}$ , 3 – электрооптический элемент из  $\text{LiNbO}_3$ , 4,11,14 – пластины-поляризаторы, 5 – нелинейный элемент ПГС из КТР ( $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=0^\circ$ ), 6 – общее зеркало двух резонаторов, частично прозрачное для сигнальной длины волны ПГС 1572 нм и глухое для волны накачки 1064 нм, 7,13 – глухое зеркало для  $\lambda_n=1064$  нм, 8 – глухое зеркало резонатора ПГС для сигнальной длины волны  $\lambda_c=1572$  нм и прозрачное для излучения с  $\lambda_n$ , 9,15 – поворотные зеркала, 10–90-градусный вращатель плоскости поляризации излучения с  $\lambda_n=1064$  нм из оптически активного кристаллического кварца, 12 – четвертьволновая пластина, 16 – поворотное параметрическое зеркало, частично прозрачное для сигнальной волны и глухое для волны накачки, 17,19 – нелинейный элемент из кристалла *LBO* ( $\theta=20^\circ$ ,  $\varphi=90^\circ$ ) в термостате, 18–45° вращатель плоскости поляризации излучения с  $\lambda_n=1064$  нм, 20 – элемент из КТР ( $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=23^\circ$ ) в термостате, 21 – поворотное зеркало для излучения с 1572 нм, 22 – поворотная призма

с  $\lambda_n=1064$  нм было предложено добавить двухпроходный усилитель [14]. В результате этого появилась возможность осуществить генерацию синего излучения при взаимодействии второй гармоники сигнальной волны 786 нм и усиленного излучения волны накачки 1064 нм. Так как в этом случае необходимость в красном излучении отпадает, нелинейный элемент из КТР, в котором осуществлялась генерация суммарной частоты  $\lambda_{\Sigma 1}=635$  нм, из выходного тракта следует удалить. При помещении нелинейных элементов из *LBO* и КТР в термостаты для выполнения условия синхронизма при изменении температуры окружающей среды возникает возможность оперативно переключать длину волны излучений в видимом диапазоне с 532 на 452 нм за счёт коммутации электропитания термостатов. Так как инфракрасное излучение 1572 нм относительно безопасно для человеческого зрения, оно может быть использовано для постоянного контроля высоты полёта авиационного носителя лидара. Таким образом, предлагаемую трёхволновую лазерную систему логично считать многофункциональной с аббревиатурой *IGB-MLS*.

Оптическая схема многофункциональной системы *IGB-MLS* представлена на рис. 2.

В лазерной системе *IGB-MLS* ПГС генерирует излучение сигнальной волны с 1572 нм в оптимальном по энергии моноимпульсов режиме № 3. При

этом излучение накачки с 1064 нм, выходящее из резонатора после отражения от пластины-поляризатора, характеризуется более короткими временными и минимальными по энергии параметрами моноимпульсов. Это излучение усиливается в двухпроходном усилителе и затем с помощью зеркал и пластины-поляризаторов заводится в общий канал для генерации второй гармоники излучения с 532 нм и суммарной частоты излучения с 452 нм. Небольшая часть излучения с 1572 нм, отражённая от зеркала 16, после прохождения призмы 22 изменяет направление распространения на небольшой угол (10–15°) и поэтому может использоваться для измерения высоты полёта над уровнем моря. При включении электропитания для усилителя и всех термостатов на выходе системы появляются излучения с длинами волны 1064, 532 и 452 нм. Коммутация электропитания для термостатов 19 и 20 позволяет оперативно переключать длины волн излучения с 532 на 452 нм. При этом по каналу излучения с 1572 нм продолжается измерение высоты полёта авианосителя.

#### 5. Заключение

Представленные в работе результаты по измерению временных параметров моноимпульсов излучения модернизированного *RGB*-лазера свидетельствуют о возможности существенного сокращения этих параметров за счёт



Таблица 1

Значения временных параметров  $\tau_{0,5}$  и  $\tau_{\Phi}$  моноимпульсов излучений

$\lambda$ , нм	$\tau_{0,5}$ , нс	$\tau_{\Phi}$ , нс	Режим
1572	4,6	3	2
1064	14	10	1
1064	8	7	2
786	3,4	2,8	2
635	4	2,6	2
532	7,6	4,3	1
532	5	3,4	2
452	3,4	3,2	2
355	6	5,3	1
355	3	3,5	2

перекачки спада моноимпульса излучения накачки в излучение сигнальной волны внутрирезонаторного ПГС. Генерация второй гармоники излучения сигнальной волны ПГС на длине волны 786 нм в дополнительно установленном в RGB-лазере нелинейном элементе из кристалла LBO позволяет осуществить генерацию суммарной частоты излучения 452 нм при взаимодействии излучений 786 и 1064 нм. Полученные экспериментальные результаты позволяют ожидать от предложенной трёхволновой многофункциональной лазерной системы IGB-MLS с дополнительным двухпроходным усилителем излучения 1064 нм более высоких значений энергий моноимпульсов излучений на длинах волн 532 и 452 нм с более короткой длительностью по сравнению RGB-лазером. При коммутации электропитания термостатов с соответствующими нелинейными элементами возникает возможность оперативного переключения длин волн в сине-зелёном диапазоне. Кроме того, на выходе предложенной системы будет постоянно присутствовать безопасное для зрения излучение на длине волны 1572 нм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vasilkov, A.P., Goldin, Yu.A., Gureev, B.A., Hoge, F.E., Swift, R.N., and Wright, C.W.* Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean // *Appl. Opt.*, 2001, Vol. 40, pp. 4353–4364.
2. *Churnside, J.H., Ostrovsky, L.A.* Lidar observation of a strongly nonlinear internal wave in the gulf of Alaska // *Intern. Journal of Remote Sensing*, 2005, Vol. 26, #1, pp. 167–177.

3. *Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А.* Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2021. – Т. 14. – № 3. – С. 86–97.

4. *Churnside, J.H., Donaghy, P.L.* Thin scattering layers observed by airborne lidar // *ICES Journal of Marine Science*, 2009, Vol. 66, pp. 778–789.

5. *Goldin, Yu.A., Gureev, B.A., Ventskut, Yu.I.* Shipboard polarized lidar for seawater column sounding // *Proc. SPIE*, 2007, Vol. 6615, 66150E.

6. *Оптика океана*, Том 2. – М. Изд. Наука. – 1983. – 237 с.

7. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. Гидрометеиздат. – 1983. – 280 с.

8. *Волков В.Г.* Твердотельные лазеры с накачкой мощными лазерными диодами, используемые в системах обеспечения безопасности // *Системы управления, связи и безопасности*. – 2016. – № 2. – С. 142–181.

9. *Аламтiev М.В., Ляшенко А.И.* Импульсные лазеры на АИГ: Nd<sup>3+</sup> с параметрическими генераторами света, Материалы 10-й Международной научно-технической конференции. // *Российское НТОРЭС им. А.С. Попова*. – 2017. – С. 184–186.

10. *Ляшенко А.И., Польщикова О.В., Мачихин А.С., Власова (Рамазанова) А.Г., Пожар В.Э., Козлов А.Б.* Трёхцветная цифровая голографическая микроскопия на основе интерферометра Маха-Цендера и твердотельного RGB-лазера // *Квантовая электроника*. – 2020. – Т. 50, № 7. – С. 662–666.

11. *Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В.* Прикладная нелинейная оптика. – Из-во Физматлит. М. 2004. – С. 278–322.

12. *Ляшенко А.И., Павлович В.Л.* Импульсный твердотельный лазер с перестрой-

кой длины волны излучения // Патент РФ № 21018171996.

13. *Мачихин А.С., Шарикова М.О., Ляшенко А.И., Козлов А.Б., Пожар В.Э., Ломононов В.А., Стойкова Е.* Атенюация интенсивностей спектральных компонент многоволновой импульсной лазерной системы за счёт брэгговской дифракции излучения на нескольких акустических волнах // *Квантовая электроника*. – 2022. – Т. 52, № 5. – С. 454–458.

14. *Аламтiev М.В., Володина Е.М., Кукушкин В.А., Ляшенко А.И.* Многофункциональная лазерная система // Патент РФ на полезную модель № 210987 от 12.01.2022.



**Ляшенко Александр Иванович**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник. Окончил в 1971 г. физический факультет МГУ им М.В. Ломоносова. Старший научный сотрудник Учреждения РАН «На-

учно-технологический центр уникального приборостроения РАН»



**Гульдин Юрий Анатольевич**. Окончил физический факультет МГУ им М.В. Ломоносова в 1965 г. Работает ведущим научным сотрудником в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН



**Володина Екатерина Максимовна**.

Окончила 2020 г. факультет стандартизации и метрологии Российского технологического института МИРЭА (РТУ МИРЭА). Инженер-исследователь

Учреждения РАН «Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН»



**Кукушкин Владислав Александрович**. Окончил в 2021 г. факультет радиоэлектроники и лазерной техники ИГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант 2-го года обучения Учреждения РАН «Научно-техно-

логический центр уникального приборостроения РАН»