

Малогабаритный автономный лазер на $YAG:Nd^{3+}$, работающий в режиме генерации цуга импульсов с модуляцией добротности пассивным затвором на $YAG:Cr^{4+}$

Н.М.Бузинов, В.Г.Дмитриев, В.Н.Забавин, А.А.Казаков, А.А.Маслов, Е.М.Спицын

Теоретически исследованы и проанализированы энергетические и временные характеристики лазера на $YAG:Nd^{3+}$ в режиме генерации цуга импульсов с модуляцией добротности пассивным затвором на $YAG:Cr^{4+}$. Дано описание и приведены технические характеристики малогабаритного автономного лазера с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники (ВРГВГ) в режиме цуга импульсов. Лазер обеспечивает высокую суммарную энергию цуга при относительно невысокой пиковой мощности отдельного импульса, стабильную работу в широком диапазоне температур, а также имеет небольшие массу и габариты, что создает удобство в эксплуатации. Оригинальные технические решения – схема ВРГВГ при втором типе синхронизма без применения поляризаторов, использование температурно-некритичного синхронизма в кристаллах КТР, пылевлагонепроницаемый корпус лазера и импульсный блок питания лампы накачки от батарей – позволили повысить надежность и стабильность работы лазера.

Ключевые слова: внутрирезонаторная генерация второй гармоники, пассивный затвор, цуг импульсов, скоростные уравнения.

1. Введение

Создание твердотельных лазеров с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники (ВРГВГ), позволяющих эффективно преобразовывать частоту основного (лазерного) излучения в сине-зеленый диапазон спектра, является актуальной задачей квантовой электроники. Режим ВРГВГ традиционно и успешно использовался в лазерах с непрерывным излучением, а также в импульсных режимах при относительно малых коэффициентах усиления активной среды (см., напр., [1–5]). В режиме импульсной накачки и модуляции добротности резонатора электрооптическим затвором (режим генерации импульсов с частотой следования до 500 Гц) оптимальные излучательные потери при ГВГ составляют 5%–15%, а энергия импульсов второй гармоники, как правило, не превышает 50 мДж при длительности импульсов 10–30 нс. Генерация основного излучения в лазерах при ВРГВГ развивается в резонаторах с «глухими» зеркалами, и возможность увеличения энергии импульса второй гармоники ограничивается оптической стойкостью внутрирезонаторных элементов.

Режим генерации цуга импульсов излучения в пределах одного импульса накачки, характерный для модуляции добротности резонатора с помощью пассивного (фототропного) затвора, открывает новые возможности увеличения энергии импульса второй гармоники [6–13]. В этом режиме возможно получение высокой суммарной энергии цуга импульсов как при малых, так и при высоких энергиях отдельного импульса. С увеличением энер-

гии накачки энергия каждого импульса остается практически постоянной, зато увеличивается число импульсов в цуге. При этом суммарная энергия импульсов второй гармоники может достигать 200 мДж вдали от порога оптического разрушения элементов резонатора.

В отличие, например, от лазера на парах меди, обеспечивающего частоту повторения импульсов 10–20 кГц, частота следования импульсов в цуге лазера на $YAG:Nd^{3+}$ может превышать 300 кГц. Такие лазеры представляют практический интерес в применениях, требующих получения высокой суммарной энергии излучения за время, сопоставимое с длительностью импульса накачки (т.е. за время ~ 100 мкс), при относительно невысоких энергиях каждого импульса в цуге (10–30 мДж при длительности импульса 10–30 нс). В лазерах на $YAG:Nd^{3+}$ и $YVO_4:Nd^{3+}$ широко используются пассивные затворы на кристалле $YAG:Cr^{4+}$ («черном» гранате), которые по совокупности параметров превосходят другие затворы, например затворы на кристаллах $LiF:F_2^-$, и наиболее удобны при использовании в переносных приборах.

В настоящей работе проведены теоретические исследования, а также представлено описание и даны технические характеристики лазера на $YAG:Nd^{3+}$ с ВРГВГ и модуляцией добротности резонатора пассивным затвором на $YAG:Cr^{4+}$ в режиме цуга импульсов.

2. Теория

Для теоретической оценки параметров излучения лазера с модуляцией добротности пассивным затвором используем систему скоростных (балансных) уравнений. ГВГ будем рассматривать как нелинейные потери для основного излучения. В приближениях плоских волн, медленно меняющихся амплитуд и заданного поля основного излучения выражение для мощности второй гармоники можно записать в виде [3–5]

Н.М.Бузинов, В.Г.Дмитриев, В.Н.Забавин, А.А.Казаков, А.А.Маслов, Е.М.Спицын. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: docam@ Rambler.ru

$$P_{2\omega} = K_{nl} \frac{l_{cr}^2}{S_{cr}} P_{\omega}^2. \quad (1)$$

Здесь

$$K_{nl} = \frac{\omega^2 d_{eff}^2}{c^3 \epsilon_0 n_s^\omega n_f^\omega n_f^{2\omega}};$$

l_{cr} – длина нелинейного кристалла; ω – частота основного излучения; d_{eff} – коэффициент эффективной нелинейности; c – скорость света в вакууме; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; n_s^ω , n_f^ω , $n_f^{2\omega}$ – коэффициенты преломления медленной и быстрой основных волн и быстрой волны второй гармоники; S_{cr} – площадь пучка основного излучения в нелинейном кристалле.

Выразив плотность фотонов в резонаторе через мощность основного излучения, запишем выражение для нелинейных потерь, связанных с преобразованием основного излучения во вторую гармонику [5]:

$$\delta_{nl} = \frac{P_{2\omega} t_c}{\hbar \omega \Phi S_{cr} L_c} = \frac{K_{nl}}{4\pi} \hbar \omega c l_{cr}^2 \Phi, \quad (2)$$

где Φ – плотность фотонов внутри резонатора; $t_c = 2L_c \times c^{-1}$ – время полного обхода резонатора с оптической длиной L_c ; \hbar – постоянная Планка.

Система скоростных уравнений лазера с модуляцией добротности резонатора пассивным затвором может быть записана в виде [4, 5]

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\Phi}{t_c} \left(2\sigma_a n_a l_a - 2\sigma_{gs} n_{gs} l_s - 2\sigma_{es} n_{es} l_s - \ln \frac{1}{R} - \delta_{nl} - L \right),$$

$$\frac{dn_a}{dt} = R_p - c\sigma_a n_a \Phi, \quad (3)$$

$$\frac{dn_{gs}}{dt} = -c\sigma_{gs} n_{gs} \Phi + \frac{n_{es}}{\tau_s},$$

$$n_{gs} + n_{es} = n_0,$$

где n_a – инверсная населенность в активной среде; σ_a – эффективное сечение стимулированного излучения; l_a – длина активной среды; n_{gs} и n_{es} – населенности центров просветляющегося фильтра в основном и возбужденном состояниях; n_0 – начальная плотность центров поглощения; σ_{gs} и σ_{es} – сечения поглощения из основного и возбужденного состояний центров поглощения пассивного затвора; l_s – длина пассивного затвора; τ_s – время жизни фотона в возбужденном состоянии пассивного затвора; R – коэффициент отражения выходного зеркала; L – ненасыщающиеся (пассивные) потери резонатора во всех элементах лазера; R_p – скорость накачки.

Временные и энергетические характеристики излучения лазера в значительной степени зависят от формы импульса накачки. При решении системы уравнений (3) импульс излучения накачки будем задавать аппроксимирующей функцией

$$g(t) = 2.7bt \exp(-bt), \quad (4)$$

где b – коэффициент, определяющий длительность импульса накачки (в c^{-1}).

Форма импульса накачки, аппроксимированная выражением (4), показана на рис.1. С учетом (4), скорость

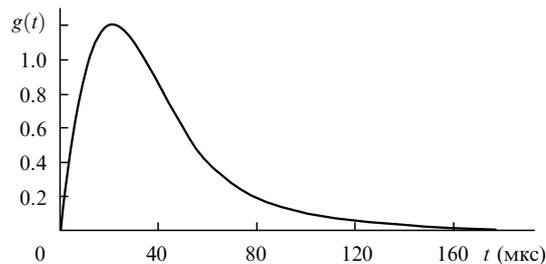


Рис.1. Форма импульса накачки, заданная выражением (4) при $b = 5 \times 10^4 c^{-1}$.

накачки в системе уравнений (3) может быть задана выражением

$$R_p(t) = \frac{P_p^{max} \gamma_p g(t)}{V_a \hbar \omega_p}, \quad (5)$$

где P_p^{max} – максимальная пиковая мощность накачки; γ_p – коэффициент эффективности накачки; V_a – объем активной среды; $\hbar \omega_p$ – энергия одного фотона на частоте излучения накачки.

Энергия и длительность импульсов излучения лазера с пассивной модуляцией добротности зависят от начального пропускания пассивного затвора. Это приводит к своеобразному характеру зависимости энергии излучения таких лазеров от оптической накачки активного элемента. При достаточно длительной накачке после высвечивания первого импульса лазер может генерировать два, три и более импульсов. Энергия накачки, необходимая для генерации второго и последующих импульсов, зависит от скорости накачки, начальной плотности пассивного затвора и скорости его затемнения после генерации импульса. При использовании быстрорелаксирующих пассивных затворов в лазере может установиться режим периодических пульсаций [7]. В этом случае к моменту генерации каждого импульса начальное поглощение пассивного затвора полностью восстанавливается. Такой режим генерации позволяет получать последовательность (цуг) импульсов в пределах одного импульса накачки.

Дискретный характер излучения, обусловленный числом генерируемых импульсов, приводит к ступенчатой зависимости общей энергии излучения от энергии накачки активного элемента. После выполнения условия генерации одного импульса (при увеличении энергии накачки) энергия отдельного импульса в одномодовом режиме не меняется, а в многомодовом – меняется незначительно за счет развития генерации в поперечном сечении резонатора [14]. Это связано с тем, что после высвечивания импульса пассивный затвор закрывается и оставшейся энергии накачки недостаточно для создания инверсной населенности в активном элементе, необходимой для повторного просветления затвора. При дальнейшем увеличении энергии накачки наступает момент, когда пассивный затвор в пределах одного импульса накачки успевает открыться два раза – лазер генерирует два импульса. Если продолжать увеличивать энергию накачки, а следовательно, и ее скорость, лазер будет генерировать три, четыре и более импульсов. На рис.2 представлена типичная зависимость энергии генерации от энергии накачки для лазера с ГВГ и пассивной модуляцией добротности. Расчет проводился при следующих параметрах: $\sigma_a = 8.8 \times 10^{-19} \text{ см}^2$, $l_a = 6.5 \text{ см}$, $L_c = 20 \text{ см}$, $R = 0.9$, $L = 0.1$,

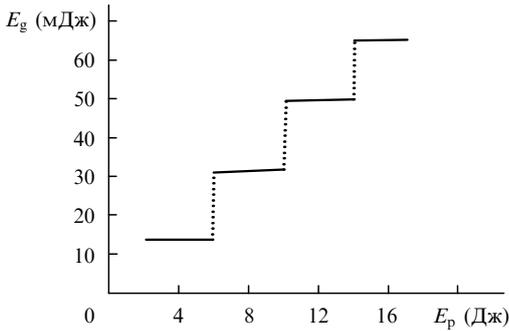


Рис.2. Типичная зависимость энергии генерации второй гармоники от энергии накачки для лазера с ГВГ и пассивной модуляцией добротности.

$\sigma_{gs} = 4.3 \times 10^{-18} \text{ см}^2$, $\sigma_{es} = 8.2 \times 10^{-19} \text{ см}^2$, $n_0 = 5.5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $l_s = 0.25 \text{ см}$, $\tau_s = 3.2 \times 10^{-6} \text{ с}$, $n_s^\omega = 1.830$, $n_f^\omega = 1.746$, $n_f^{2\omega} = 1.789$, $l_{cr} = 10 \text{ см}$ и $d_{eff} = 7.2 \times 10^{-12} \text{ м/В}$.

При уменьшении начального пропускания просветляющегося фильтра диапазон изменения потерь, а следовательно, и инверсной населенности возрастает. В результате этого уменьшается длительность и увеличивается амплитуда импульсов, растет расстояние между ними, а также время высвечивания первого импульса (рис.3). С повышением энергии накачки время высвечивания первого импульса в цуге уменьшается. На рис.4 представлена зависимость времени высвечивания первого импульса от энергии накачки.

На рис.5 и 6 показаны результаты расчета генерации лазера с использованием системы уравнений (3). Прове-

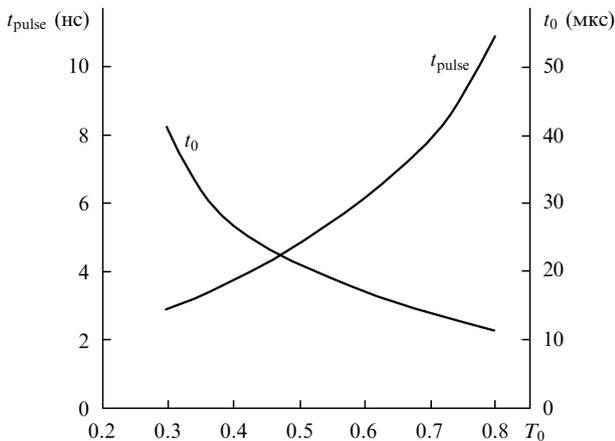


Рис.3. Зависимости длительности импульса t_{pulse} и времени высвечивания первого импульса из цуга t_0 от начального пропускания пассивного затвора T_0 ($T_0 = \exp(-\sigma_{gs}n_0l_s)$).

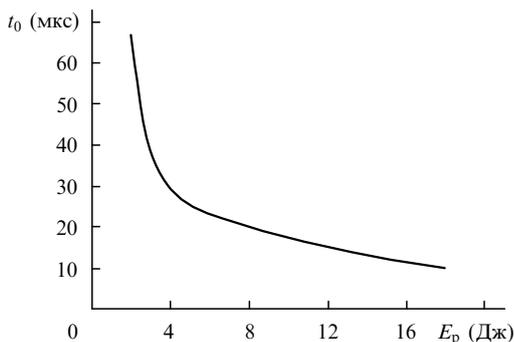


Рис.4. Зависимость времени высвечивания первого импульса из цуга t_0 от энергии накачки E_p .

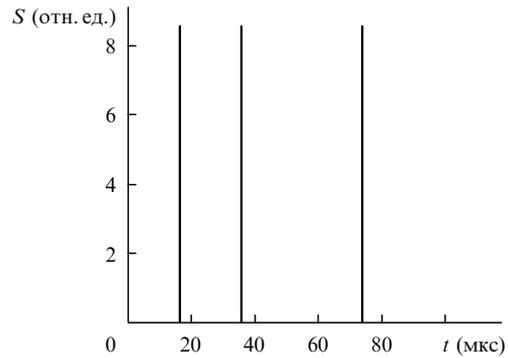


Рис.5. Цуг импульсов излучения лазера с пассивной модуляцией добротности.

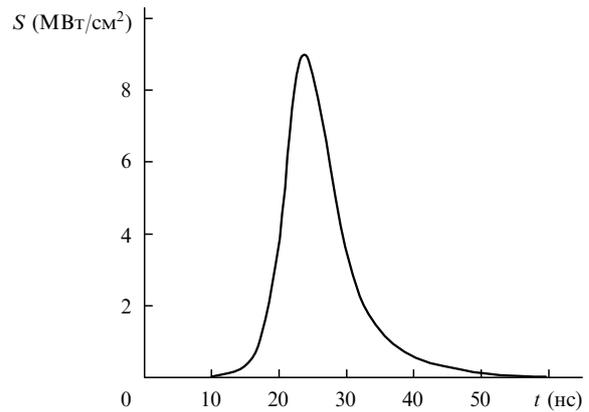


Рис.6. Типичная форма отдельного импульса из цуга импульсов.

денные расчеты позволяют качественно оценить зависимости энергетических и временных характеристик выходного излучения лазера от формы и энергии импульса накачки, а также от параметров пассивного затвора, активного и нелинейного элементов лазера.

3. Описание лазера и результаты экспериментов

В схеме созданного лазера с ВРГВГ в режиме цуга импульсов использованы оригинальные решения, позволяющие повысить надежность и стабильность работы лазера. Среди них – схема ВРГВГ при втором типе синхронизма в отсутствие поляризаторов, использование температурно-некритичного синхронизма в кристаллах КТР [15], пылевлагонепроницаемый корпус лазера, импульсный блок питания лампы накачки от батарей типа АА. Схема лазера показана на рис.7. Общая длина резонатора составляла 200 мм. Активный элемент и лампа накачки размещались в эллиптическом отражателе с конвективным охлаждением.

Активный элемент из YAG: Nd^{3+} , вырезанный вдоль кристаллографической оси [001], ориентировался в отражателе таким образом, чтобы ось [010] составляла 45° с плоскостью, в которой расположены лампа накачки и активный элемент. При такой ориентации деполаризационные потери основной моды, поляризованной в плоскости лампы накачки – активный элемент или ортогонально этой плоскости, минимальны [16]. В этом случае в отсутствие внутррезонаторных поляризаторов генерация лазера будет возникать на линейной (или близкой к линейной) поляризации, ориентированной по минимуму «розочки» остаточного светового потока (ОСП). Одна-

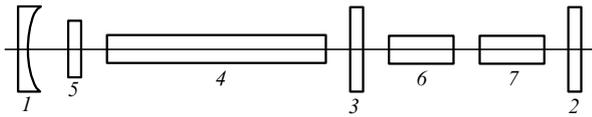


Рис.7. Схема лазера:

1 – зеркало с радиусом кривизны 3 м и коэффициентом отражения не менее 99.5% на основной частоте и частоте второй гармоники; 2 – зеркало с коэффициентом отражения не менее 99.5% на основной частоте и не более 8% на частоте второй гармоники; 3 – возвратное зеркало с коэффициентом отражения не более 0.5% на основной частоте и не менее 99% на частоте второй гармоники; 4 – активный элемент $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ ($\varnothing 5 \times 65$ мм); 5 – пассивный затвор на $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$ ($\varnothing 5 \times 2$ мм) с пропусканием в непросветленном состоянии 50%; 6, 7 – нелинейные кристаллы КТР (длина каждого 10 мм).

ко из-за наличия двух взаимно перпендикулярных направлений минимума ОСП направление поляризации неустойчиво и может скачкообразно изменяться на 90° . Того или иного направления поляризации можно добиться юстировкой резонатора, выводя в генерацию различные моды.

Пассивный затвор на $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$ размещался в резонаторе с учетом анизотропии насыщающегося поглощения [6, 13]. При этом в отсутствие нелинейных кристаллов лазер генерировал излучение, поляризация которого соответствовала пространственной ориентации одной из двух ортогональных групп центров Cr^{4+} (третья группа центров Cr^{4+} направлена вдоль оптической оси резонатора). Пассивный затвор был установлен в резонаторе так, что пространственная ориентация одной из двух ортогональных групп центров Cr^{4+} совпадала с одним из направлений минимума «розочки» ОСП.

В качестве преобразователей частоты использовались два кристалла КТР, вырезанные под углом температурно-некритичного синхронизма второго типа. Для реализации фазового синхронизма второго типа в нелинейном кристалле должны распространяться две волны основного излучения со взаимно ортогональными поляризациями и разными фазовыми скоростями. В результате после прохода через нелинейный кристалл плоскополяризованное излучение может стать эллиптически поляризованным.

В схемах с акустооптической и электрооптической модуляциями добротности, а также при использовании в резонаторе дополнительного поляризатора деполяризация излучения в нелинейном кристалле может приводить к снижению мощности основного излучения, т. е. вносить деполяризационные потери в резонатор лазера. В этих случаях для компенсации набега фаз в нелинейном кристалле обычно используют пластину $\lambda/4$ либо юстировкой нелинейного кристалла добиваются такого его положения, при котором одновременно за два прохода достигается отсутствие сдвига фаз между ортогональными составляющими основного излучения и выполняется условие синхронизма. Однако такие схемы чувствительны к температурным колебаниям окружающей среды, приводящим к флуктуациям энергетических характеристик лазера.

В лазере с пассивной модуляцией добротности в отсутствие дополнительных поляризаторов наблюдается совсем иная картина. Генерация происходит на тех модах, для которых деполяризационные потери минимальны, а это моды с поляризацией, параллельной поляризации быстрой или медленной волны, распространяющей-

ся в нелинейном кристалле. Если теперь вспомнить, что для ГВГ второго типа необходимы две ортогональные составляющие основного излучения (быстрая и медленная волны), то становится ясно, что эффективное преобразование частоты в такой схеме невозможно. Более того, т. к. зеркала резонатора при ВРГВГ имеют для основного излучения высокие коэффициенты отражения, излучение из резонатора выводиться не будет, что может стать причиной «прогаров» оптических элементов лазера.

Для устранения описанного эффекта в лазере были использованы два нелинейных кристалла КТР, развернутых относительно друг друга вокруг оптической оси резонатора на угол 45° . В этом случае как минимум в одном из нелинейных кристаллов всегда будет распространяться две ортогональные составляющие основного излучения и соответственно будет генерироваться вторая гармоника.

Таким образом, использование пары кристаллов КТР, развернутых относительно друг друга вокруг оптической оси резонатора на угол 45° , позволило избежать «прогаров» оптических элементов резонатора и отказаться от размещения внутри него дополнительных поляризаторов. В дополнение к этому температурно-некритичный синхронизм в нелинейных кристаллах обеспечил стабильную работу лазера в диапазоне температур эксплуатации лазера (от -10 до $+50^\circ\text{C}$) без применения термостабилизирующих устройств.

В лазере использована однонаправленная схема вывода второй гармоники, поэтому для вывода преобразованного излучения, генерируемого на обратном проходе через нелинейные кристаллы после отражения основного излучения от выходного зеркала, применялось возвратное зеркало. Такое зеркало имеет высокий коэффициент пропускания на основной частоте и высокий коэффициент отражения на частоте второй гармоники. Мощность излучения второй гармоники на выходе лазера с возвратным зеркалом была в 1.5 раза больше, чем в лазере без него. Относительно небольшое увеличение выходной мощности связано с дополнительными потерями, вносимыми этим зеркалом в резонатор.

На рис.8 дана осциллограмма цуга импульсов излучения лазера. Каждый импульс в цуге имеет длительность 30–40 нс, а длительность цуга составляет около 100 мкс. Из-за инерционности используемого при измерениях фотодиода отдельные импульсы на представленной осциллограмме затянуты. Длительность отдельного импульса измерялась при помощи лавинного фотодиода.

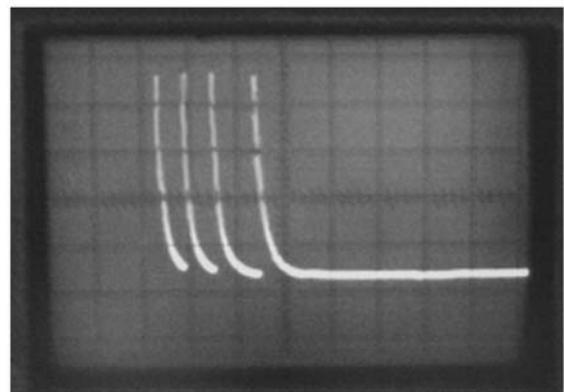


Рис.8. Осциллограмма цуга импульсов излучения лазера.

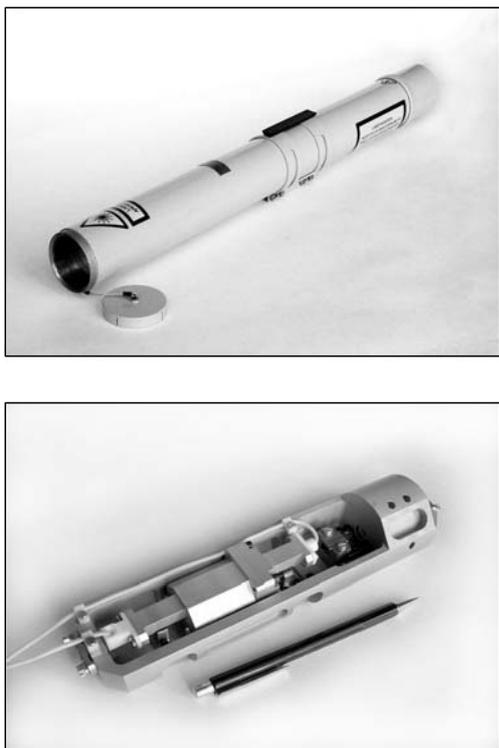


Рис.9. Общий вид лазера (а) и излучатель лазера (б).

На рис.9 показаны лазер и излучатель без внешнего пылевлагонепроницаемого кожуха. Ниже представлены технические характеристики лазера.

Длина волны лазерного излучения (нм)	532
Режим работы.	цуг импульсов
Энергия в цуге импульсов (мДж).	не менее 100
Частота повторения цуга импульсов (Гц).	не менее 0.2
Расходимость луча (по уровню 0.5) (мрад).	не более 1
Источник питания.	12 В постоянного тока (8 шт. последовательно соединенных батарей типа АА (1.5 В))
Число цугов импульсов (без замены батарей)	~ 200
Габариты:	
диаметр (мм)	64
длина (мм)	610

4. Заключение

В работе теоретически исследованы и проанализированы энергетические и временные характеристики лазера на YAG: Nd³⁺, работающего в режиме генерации цуга импульсов с модуляцией добротности пассивным затвором на YAG: Cr⁴⁺.

Приведено описание и даны технические характеристики созданного малогабаритного автономного лазера с ВРГВГ в режиме цуга импульсов. Оригинальные технические решения – схема ВРГВГ при синхронизме второго типа без поляризаторов, использование температурно-некритичного синхронизма в кристаллах КТР, пылевлагонепроницаемый корпус лазера и импульсный блок питания лампы накачки от батарей типа АА – позволили повысить надежность и стабильность работы лазера.

Лазер обеспечивает большую суммарную энергию цуга импульсов при относительно невысокой пиковой мощности отдельного импульса, стабильную работу в широком диапазоне температур. Небольшие масса и габариты обеспечивают удобство эксплуатации лазера.

1. Коновалов В.А., Павлович В.Л., Раевский Е.В. *Квантовая электроника*, **32**, 192 (2002).
2. Коновалов В.А., Павлович В.Л., Раевский Е.В., Шалаев Е.А. *Электронная техника: Лазерная техника и оптоэлектроника*, № 1, 39 (1990).
3. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Физматлит, 2004).
4. Zheng J.A., Zhao S.Z., Chen L. *Opt. Commun.*, **199**, 207 (2001).
5. Zheng J.A., Zhao S.Z., Chen L. *Opt. Eng.*, **41**, 1970 (2001).
6. Ильичев Н.Н., Кирьянов А.В., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **25**, 155 (1998).
7. Пилипович В.А., Ковалев А.А. *Оптические квантовые генераторы с просветляющимися фильтрами* (Минск: Наука и техника, 1975).
8. Ильичев Н.Н., Кирьянов А.В., Гулямова Э.С., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **27**, 307 (1997).
9. Ильичев Н.Н., Гулямова Э.С., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **27**, 1001 (1997).
10. Ильичев Н.Н., Кирьянов А.В., Гулямова Э.С., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **28**, 19 (1998).
11. Okhrimchuk A.G., Shestakov A.V. *Opt. Mater.*, № 3, 1 (1994).
12. Xiao G., Bass M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 41 (1997).
13. Okhrimchuk A.G., Shestakov A.V. *Phys. Rev.*, **61**, 988 (2000).
14. Тарасов Л.В. *Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения* (М.: Сов. радио, 1981).
15. Гречин С.Г., Дмитриев В.Г., Дьяков В.А., Прялкин В.И. *Квантовая электроника*, **25**, 25 (1998).
16. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д. *Лазеры на кристаллах и их применение* (М.: Рикел, Радио и связь, 1994).