Параметрическая генерация света среднего ИК диапазона и удвоение частоты излучения импульсно-периодического Tm^{3+}:YAP -лазера с волоконно-лазерной накачкой в периодически поляризованном кристалле $MgO:LiNbO_3$ с веерной доменной структурой

О.Л.Антипов, Д.Б.Колкер, А.А.Добрынин, Ю.А.Гетмановский, В.В.Шарков, М.А.Чувакова, А.Р.Ахматханов, В.Я.Шур, И.А.Шестакова, С.В.Ларин

Приведены результаты экспериментальных исследований нелинейно-оптического преобразования частоты излучения импульсно-периодического Tm^{3+}:YAP- лазера на длине волны 1941 нм с накачкой излучением непрерывного волоконного лазера на 1670 нм. В периодически поляризованном $MgO:LiNbO_3$-кристалле с веерной доменной структурой путем подбора периода и температуры реализованы как параметрическая генерация света среднего ИК диапазона, так и удвоение частоты лазерного излучения. Эффективность по энергии импульсной параметрической генерации в режиме, близком к вырожденному, на длинах волн 3820–3970 нм превышала 43%, а эффективность генерации второй гармоники на длине волны 970.5 нм достигала 34%.

Ключевые слова: *твердотельные лазеры, двухмикронный диапазон длин волн, волоконные лазеры, нелинейно-оптическое преобразование частоты, периодически поляризованные кристаллы $MgO:LiNbO_3$, параметрический генератор света, средний ИК диапазон, удвоение частоты.*

1. Введение

Нелинейно-оптические преобразования позволяют существенно расширить диапазон длин волн мощного когерентного лазерного излучения. Лазеры двухмикронного диапазона на длинах волн 1900–2100 нм, широко применяющиеся в различных областях (хирургия и урология, прецизионная обработка материалов, дистанционная экологическая диагностика и др.), являются хорошим источником излучения накачки для параметрических генераторов света (ПГС) среднего ИК диапазона с сигнальной и холостой волнами на $\lambda = 3.5–5$ мкм [1, 2]. С помощью удвоения частоты и генерации гармоник излучение этих лазеров может быть преобразовано также в коротковолновый ближний ИК или видимый диапазон длин волн [3, 4].

Среди твердотельных лазеров двухмикронного спектрального диапазона на кристаллах, активированных ионами Ho^{3+} или Tm^{3+}, наибольшие средние мощности излучения при высоком качестве пучка достигаются при использовании когерентной накачки излучением волоконных или твердотельных лазеров [2, 5–7]. Резонансная накачка «в полосу», обеспечивающая малый квантовый дефект, позволяет с высокой эффективностью получать среднюю мощность генерации более 200 Вт в пучке высокого качества (с расходимостью, близкой к дифракционному пределу) в лазерах на кристалле Ho^{3+}:YAG, например [8].

При использовании двухмикронного излучения лазеров на кристаллах Ho^{3+}:YAG для накачки ПГС и параметрических усилителей на основе нелинейных кристаллов $ZnGeP_2$ (ZGP) в последние годы достигнута мощность 160 Вт и энергия в импульсах более 200 мДж в среднем ИК диапазоне (на длинах волн 3700–4800 нм) [9, 10]. Это оказалось возможным благодаря совокупности нескольких базовых параметров, которыми обладает нелинейный кристалл ZGP: высокие квадратичная нелинейность и двулучепреломление, а также теплопроводность и твердость [11]. Совершенный (идеальный) кристалл ZGP прозрачен в интервале длин волн 0.74–8 мкм, однако поглощение за счет примесей и дефектов кристаллической решетки ограничивает возможности его использования в нелинейной оптике на длинах волн менее 2 мкм. Ограничения использования ZGP для мощных лазерных

О.Л.Антипов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603022 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1; e-mail: antipov@ipfran.ru
Д.Б.Колкер. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1
А.А.Добрынин, В.В.Шарков. Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603022 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23
Ю.А.Гетмановский. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Минина, 24
М.А.Чувакова, А.Р.Ахматханов, В.Я.Шур. Уральский федеральный университет, Россия, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
И.А.Шестакова. АО «НИИ "Полюс" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1
С.В.Ларин. ООО «НТО "ИРЭ-Полюс"», Россия, Московская обл., 141195 Фрязино, пл. Введенского, 3, стр. 5

Поступила в редакцию 5 января 2022 г.

систем связаны также с оптическим пробоем его поверхности, порог которого не превышает 2–4 Дж/см^2 даже для самых хороших образцов и может заметно снижаться в течение нескольких секунд при импульсно-периодической накачке [11–13].

Оксидные нелинейно-оптические кристаллы (такие как KTP, KTA, $LiNbO_3$, $LiTaO_3$ и др.), прозрачные в видимом и ближнем ИК диапазонах, имеют высокий порог оптического пробоя и активно используются в них для нелинейно-оптических преобразований [2, 14–17]. В периодически поляризованных кристаллах выполнение условий синхронизма нелинейно-оптического взаимодействия достигается выбором периода структуры сегнетоэлектрических доменов с противоположным направлением спонтанной поляризации. За счет различия знаков коэффициента нелинейности этих доменов реализуется фазовый квазисинхронизм (quasi-phase-matching). Среди всех периодически поляризованных оксидных структур периодически поляризованный $LiNbO_3$, легированный MgO (PPMg:LN), обладает наибольшим коэффициентом квадратичной оптической нелинейности и достаточно высоким порогом оптического пробоя в диапазоне прозрачности; кроме того, технология производства этого кристалла наиболее развита [14–16]. Кристаллы PPMg:LN используются для удвоения частоты и для параметрического преобразования в средний ИК диапазон до длины волны $\sim$4 мкм, с превышением которой многофононное поглощение в них заметно увеличивается [15]. Достоинством кристаллов PPMg:LN является также возможность их накачки излучением хорошо отработанных твердотельных лазеров на длине волны $\sim$1 мкм. Мощность ПГС среднего ИК диапазона на основе структур PPMg:LN при накачке на длине волны $\sim$1 мкм по мере улучшения качества нелинейного кристалла постепенно растет [18–23]: при накачке кристалла излучением иттербиевого волоконного лазера по схеме «задающий генератор–усилитель» в 2012 г. было получено $\sim$5.5 Вт оптической мощности холостой волны на λ = 3.82 мкм [22], а в 2022 г. сообщается о получении мощности 10.8 Вт холостой волны на λ = 3.75 мкм при накачке излучением импульсно-периодического Yb волоконного лазера [23]. Определенным недостатком накачки ПГС на λ = 1 мкм является то, что только холостая волна попадает в средний ИК диапазон (более 3 мкм), а сигнальная волна остается в ближнем ИК диапазоне на λ =1.5–2 мкм. В 2020 г. сообщалось об эффективном каскадном преобразовании в кристаллах PPMg:LN излучения волоконных лазеров: сначала осуществлялась генерация разностной частоты излучения иттербиевого и эрбиевого лазеров (на 1.06 и 1.55 мкм соответственно), а затем параметрическое усиление сигнала на длине волны $\sim$3 мкм при накачке на λ =1.55 мкм [24].

Накачка ПГС на кристалле PPMg:LN излучением двухмикронных лазеров позволяет генерировать сигнальную и холостую волны в диапазоне 3.5–4.5 мкм. Однако нелинейно-оптические преобразования двухмикронного лазерного излучения в PPMg:LN до настоящего времени исследованы мало. В кристаллах PPMg:LN ранее была реализована генерация второй гармоники (ГВГ) и более высоких гармоник излучения тулиевых волоконных лазеров на длине волны $\sim$1.9 мкм [25–27]. Было предпринято несколько попыток получить мощную параметрическую генерацию в области 3.5–4.5 мкм при накачке структур PPMg:LN излучением импульсных твердотельных лазеров двухмикронного диапазона: Tm:YAG -лазера на λ = 2012.4 нм [28], Tm,Ho:YLF -лазера на λ = 2051 нм [29], а также Tm,Ho:$GdVO_4$-лазера на λ = 2048 нм [30]. Однако заметное поглощение кристаллов $LiNbO_3$ на длине волны более 4 мкм, существенно влияющее на длинноволновую холостую волну, ограничивало импульсную энергию и среднюю мощность параметрической генерации в среднем ИК диапазоне в целом [28–30]. В наших предыдущих работах сообщалось о параметрическом преобразовании в кристаллах PPMg:LN излучения лазеров на керамике Tm^{3+}:Lu_2O_3 (λ $\sim$1.97 мкм) с высокой частотой следования импульсов, однако конкуренция параметрического преобразования и генерации гармоник затрудняла реализацию обоих эффектов при использованном источнике накачки [4, 31].

В настоящей работе представлены результаты исследований параметрической генерации в среднем ИК диапазоне и ГВГ в кристалле PPMg:LN с веерной доменной структурой при накачке твердотельным Tm^{3+}:YAP-лазером на длине волны $\lambda_p \approx 1941$ нм. Реализация этих двух нелинейно-оптических эффектов в одном кристалле оказалась возможной за счет подбора периода структуры и температуры. Использование накачки на этой длине волны позволило получить эффективную параметрическую генерацию сигнальной и холостой волн в близком к вырожденному режиме в диапазоне длин волн 3.82–3.97 мкм, в котором многофононное поглощение кристаллов $LiNbO_3$ еще мало. Кроме того, в результате удвоения частоты получено излучение на длине волны 970.5 нм.

2. Твердотельный лазер на кристалле Tm^{3+}:YAP с накачкой излучением волоконного лазера

Твердотельные лазеры на кристалле Tm^{3+}:YAP с диодной накачкой приобрели в последние годы большую популярность благодаря возможности получения высокой мощности в непрерывном режиме и реализации импульсно-периодического режима при модуляции добротности резонатора с помощью насыщающихся поглотителей или механического устройства отклонения зеркала [32–34]. В настоящей работе накачка кристалла Tm^{3+}:YAP осуществлялась излучением волоконного лазера на длине волны 1670 нм, соответствующей линии перехода $^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ (рис.1,*a*). Такая резонансная накачка кристаллов и керамик, активированных ионами Tm^{3+}, происходит за счет поглощательного переходе между теми же самыми штарковски-расщепленными уровнями $^3H_6$ и $^3F_4$, между которыми происходит излучательный переход лазерного усиления (рис.1,*a*). Это позволяет увеличить эффективность лазерной генерации, достижимой в диапазоне длин волн 1.9–2.08 мкм, и уменьшить термонаведенные искажения в активной среде по сравнению со случаем кросс-релаксационной диодной накачки [35–37].

Для накачки использовался непрерывный волоконный лазер на длине волны 1670 нм, изготовленный на основе эрбиевого лазера с эффективным ВКР-преобразованием длины волны с 1567 на 1670 нм в волоконном лазере ELM-1670-50 («НТО "ИРЭ–Полюс"», Фрязино) [38].

Активный элемент (АО «НИИ "Полюс"», Москва) был вырезан из кристалла Tm^{3+}:YAP (концентрация ионов Tm^{3+} 1 ат. %) в виде стержня длиной 25 мм и диаметром

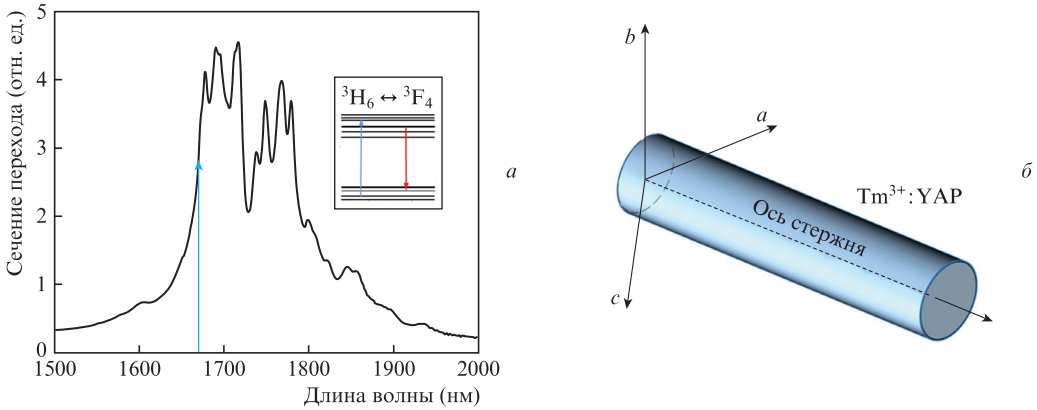

Рис.1. Спектр поглощения кристалла Tm^{3+}:YAP на линии перехода $^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ для излучения, поляризованного вдоль оси *c*, накачка на 1670 нм показана синей стрелкой (на вставке – схема накачки и генерации на переходе $^3H_6 \leftrightarrow {}^3F_4$) (*а*) и схема ориентации активного элемента относительно кристаллографических осей *a*, *b*, *c* кристалла Tm^{3+}:YAP с периодами кристаллической решетки a = 5.329 Å, b = 7.370 Å, c = 5.179 Å [39] (*б*).

3 мм, ось которого совпадала с биссектрисой угла между кристаллографическими осями *a* и *c* этого кристалла (рис.1,*б*).

Ранее в наших предварительных экспериментах с Tm^{3+}:YAP-лазерами при накачке на 1670 нм была обнаружена возможность генерации в непрерывном или импульсно-периодическом режиме на длинах волн 1890, 1897, 1938, 1941, 1985 и 1992 нм [40]. Подобная многоволновая генерация с переключением с одной длины волны на другую была ранее исследована в керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ с накачкой на 1670 нм [36, 41]. Поэтому для выделения и стабилизации генерации на длине волны 1941 нм использовалась L-образная схема резонатора Tm^{3+}:YAP-лазера (рис.2). Дихроичные диэлектрические зеркала (входное и глухое) этого резонатора сильно различались коэффициентами отражения на λ = 1941 нм и в диапазоне 1980–2000 нм: глухое зеркало на 1941 и 1670 нм имело $R > 99.5\%$ и 99% соответственно; отражение входного зеркала под углом 45° для s-поляризации превышало 99% на 1941 нм, и пропускание неполяризованного излучения накачки на 1670 нм T было более 98%. Выходное зеркало имело малый коэффициент отражения R на 1800–1900 нм и 1980–2000 нм, а на длине волны генерации R составляло ~50%. Входное и глухое зеркала были плоскими, а выходное зеркало – вогнутым с радиусом кривизны 100 мм. Глухое зеркало находилось на расстоянии 1–2 мм от торца активного элемента. Длина резонатора варьировалась в диапазоне 110–130 мм, поэтому с учетом кривизны зеркал «холодный» резонатор был близок к полусферическому. Дополнительная селекция длины волны генерации осуществлялась интерференционным фильтром ИФ, в качестве которого использовалась плоскопараллельная кварцевая пластинка толщиной ~90 мкм.

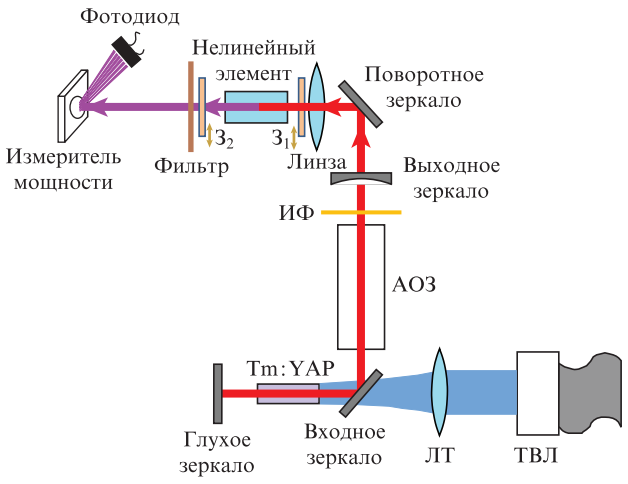

Рис.2. Схема экспериментального лазера на кристалле Tm^{3+}:YAP с накачкой излучением волоконного лазера и нелинейного преобразователя на основе PPMg:LN (ПГС или элемента удвоения частоты):
Tm:YAP – активный элемент лазера; ТВЛ – коллимирующий телескоп волоконного лазера; ЛТ – линзовый телескоп для фокусировки излучения волоконного лазера; АОЗ – акустооптический затвор; ИФ – интерференционный фильтр; $З_1$ и $З_2$ – зеркала ПГС.

Внутри резонатора находился акустооптический затвор АОЗ (АО «НИИ “Полюс”», Москва) с длиной кварцевого оптического элемента 45 мм. Драйвер АОЗ («ИП Глазков А.В.», Нижний Новгород) генерировал управляющий высокочастотный сигнал на частоте 50 МГц мощностью до 20 Вт. Частота модуляции ВЧ сигнала, определяющая частоту следования лазерных импульсов, варьировалась от 0.5 до 20 кГц. Расстояние от торца АОЗ до выходного зеркала изменялась в пределах 3–15 мм.

Диаметр пучка накачки, составлявший ~490 мкм (по уровню e^{-2} от максимальной интенсивности) на левом (ближнем к глухому зеркалу) торце активного элемента, выбирался из условия его близости к расчетному диаметру основной моды резонатора лазера с учетом тепловой линзы, наведенной в активном элементе при поглощенной мощности накачки 15 Вт. Расчет проводился с помощью пакета программ Rezonator [42], при этом использовались следующие параметры кристалла, накачки и резонатора лазера:

Поглощенная мощность накачки (Вт).....15
Коэффициент теплопроводности (Вт·см$^{-1}$·K^{-1}).....0.11 [34]
Показатель преломления.....1.92
Термооптический коэффициент $\partial n/\partial T$ (K^{-1}).... 9.7×10^{-6} [43]
Длина резонатора (мм).....120
Фокусное расстояние тепловой линзы (мм).....25
Радиус пучка генерации на левом торце активного элемента (мкм).....240

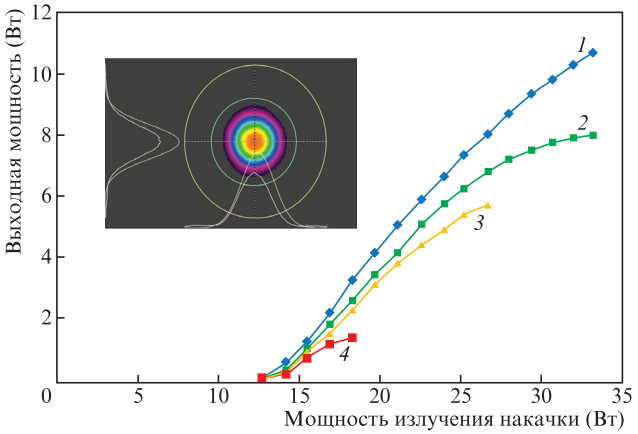

Рис.3. Выходная мощность Tm^{3+}:YAP-лазера в зависимости от мощности излучения накачки в непрерывном режиме (*1*), а также в импульсно-периодическом режиме при частоте следования импульсов 20 (*2*), 3 (*3*) и 0.5 кГц (*4*). На вставке – изображение пучка генерации, зарегистрированного камерой Pyrocam IV.

Tm^{3+}:YAP-лазер генерировал в непрерывном или в импульсно-периодическом режиме излучение со средней по времени мощностью до 11 или 8 Вт соответственно (при частоте следования импульсов 20 кГц) и высоким качеством пучка (рис.3). В зависимости от мощности параметр качества пучка M^2, определяемый методом «ножа» [44], был менее 1.1–1.4 (вставка на рис.3). Мощность измерялась прибором Coherent PM10 с индикатором $FieldMax_{II}$ или Gentec UP25N-40S с индикатором SOLO, пространственная структура пучка излучения регистрировалась пирокамерой Pyrocam IV (Ophir-Spiricon). При увеличении мощности накачки выше 30–32 Вт и дальнейшем ее росте качество пучка генерации ухудшалось: наблюдалось появление более высоких поперечных мод.

В импульсно-периодическом режиме максимальная энергия импульсов генерации и средняя мощность, а также минимальная длительность импульсов ограничивались пробоем торцов активного элемента и диэлектрических зеркал резонатора. Максимальная рабочая энергия импульсов генерации составляла 2.7, 2.4 или 1.9 мДж при частоте следования импульсов 0.5, 1 или 3 кГц соответственно. С уменьшением частоты следования импульсов средняя мощность также снижалась до ~1.35 Вт при частоте 0.5 кГц. Минимальная длительность импульсов составляла 35–50 нс при частотах их следования 0.5–3 кГц (рис.4,*а*). Следует отметить, что ограничения перечисленных выше параметров излучения Tm^{3+}:YAP-лазера определялись в основном интенсивностью импульсов на поверхности указанных оптических элементов. Оптический пробой происходил при попытках укоротить импульсы генерации при фиксированной мощности накачки путем подстройки резонатора или увеличения ВЧ мощности в АОЗ.

Спектр генерации регистрировался с помощью монохроматора M150 (Solar Laser Systems, Беларусь) и фотоприемника производства ИПФ РАН на основе фотодиода InGaAs PIN G8422-03 (Hamamatsu) с программой обработки, написанной в ИПФ РАН. Как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах спектр содержал одну линию на ~1941 нм с шириной по полувысоте менее 1 нм (точность определения ширины линии ограничивалась возможностями системы регистрации).

Пучок генерации имел вертикальную линейную поляризацию (с контрастом более 100:1), определяемую поляризационно-селективным входным зеркалом и анизотропным активным элементом Tm^{3+}:YAP.

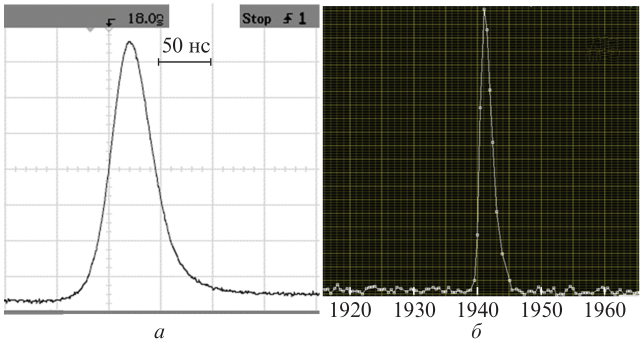

Рис.4. Осциллограмма импульса генерации при частоте следования 2 кГц и средней мощности ~4.2 Вт (*а*), а также спектр (в нм) генерации лазера (*б*).

3. Параметрический генератор на основе кристалла PPMg:LN

Излучение лазера на кристалле Tm^{3+}:YAP фокусировалось линзой в нелинейно-оптический элемент PPMg:LN (см. рис.2). Фокусное расстояние линзы варьировалось от 100 до 150 мм, и с учетом геометрической расходимости пучка лазера эффективное фокусное расстояние изменялось от 140 до 210 мм. При этом диаметр пучка накачки в фокусе изменялся от 250 до 380 мкм (по уровню e^{-2} от максимальной интенсивности), а расчетная рэлеевская длина фокальной перетяжки варьировалась от 23 до 52 мм. Диаметр пучка в нелинейном элементе определялся положением фокусирующей линзы и выбирался для получения максимальной мощности ПГС и отсутствия оптического пробоя при максимальной мощности накачки за время экспозиции до 30 с.

Элемент PPMg:LN с размерами $50 \times 20 \times 3$ мм ($X \times Y \times Z$) имел веерную доменную структуру с периодом, изменяющимся вдоль кристаллографической оси Y от 27.42 до 32.5 мкм с градиентом ~254 нм/мм (рис.5). Перестройка периода веерной структуры осуществлялась путем смещения элемента вдоль оси Y [45]. Нелинейный элемент, используемый в наших экспериментах, был из-

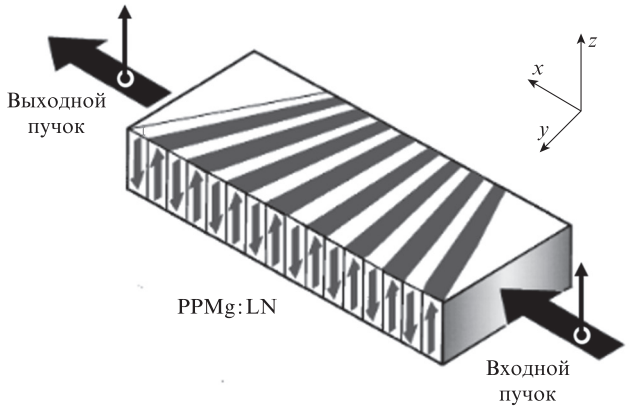

Рис.5. Схема возбуждения нелинейно-оптического элемента PPMg:LN с регулярной веерной структурой доменов с противоположным направлением спонтанной поляризации (толстые вертикальные стрелки). Показаны также линейно-поляризованные входной и выходной пучки и система координат, использованная для описания.

готовлен в ООО «Лабфер» (Екатеринбург) из монокристалла $LiNbO_3$ конгруэнтного состава, легированного MgO (5 мол.%) [46]. На рабочие плоскости YZ поверхностей кристалла были нанесены антиотражающие покрытия на длины волн ~1940 ± 50 нм и ~3.8 ± 0.1 мкм (с остаточным отражением $R < 0.5\%$). Кристалл, завернутый в индиевую фольгу, фиксировался в радиаторе и помещался в печку, температура которой управлялась электронным термоконтроллером и изменялась от 280 до 423 K (по показаниям термодатчика на нагревателе) с точностью 0.1 K.

Печка с нелинейно-оптическим элементом устанавливалась на трансляционные подвижки и помещалась в резонатор, образованный зеркалами $З_1$ и $З_2$ (см. рис.2). Входное зеркало $З_1$ было плоским и имело высокое пропускание на длине волны 1941 нм ($T > 98\%$) и высокое отражение в диапазоне длин волн 3.6–4.1 мкм ($R > 99.5\%$). Выходное зеркало $З_2$ было вогнутым с радиусом кривизны 200 мм, имеющим коэффициенты отражения R = 55%–58% для излучения в диапазоне длин волн 3.6–4.1 мкм и $R > 91\%$ на длине волны 1941 нм. Зеркала резонатора находились на расстоянии 2–3 мм от торцов кристалла PPMg:LN, общая длина резонатора ПГС составляла 54–56 мм.

Между ПГС и системой регистрации устанавливалось плоское зеркало-фильтр (диэлектрическое напыление на подложке из ZnSe), хорошо отражающее остаточное излучение накачки на 1941 нм ($R > 99\%$) и хорошо пропускающее излучение в диапазоне длин волн 3.6–4.1 мкм (T= 94%–95%). Система регистрации включала измеритель мощности Coherent PM10 с индикатором $FieldMax_{II}$ и фотоприемники производства ИПФ РАН на базе фотодиода ФД48-03NS (ООО «АИБИ», С.Петербург) для регистрации излучения на 3.8–4.1 мкм или фотодиода InGaAs PIN G8422-03 (Hamamatsu) для регистрации остаточного излучения на 1941 нм. Спектр генерации регистрировался с помощью монохроматора M150 (Solar Laser Systems, Беларусь) и фотоприемника на длине волны 3.8–4.1 мкм. Структура пучка генерации после фильтра регистрировалась с помощью камеры Pyrocam IV.

Поскольку первоначально оптимальное положение веерной структуры PPMg:LN не было известно, то положение элемента изменялось внутри резонатора ПГС путем смещения по координате Y с шагом ~0.5 мм, и в каждом положении измерялась температурная зависимость мощности генерации с шагом по температуре ~5 K. Выбиралось положение элемента и температура, при которых излучение, прошедшее через монохроматор, имело наибольшую составляющую на длине волны ~3880 нм. После предварительного определения оптимальных условий генерации положение элемента подстраивалось с точностью ~10 мкм, а температура с точностью 0.1 K. Таким образом, ПГС настраивался на режим максимальной генерации, близкий к вырожденному по длине волны (на λ = 3882 нм).

Для нахождения оптимального диаметра пучка накачки (на λ_p = 1941 нм) в нелинейном элементе проводился расчет моды резонатора ПГС (с учетом наведенной тепловой линзы) с помощью пакета программ Rezonator с параметрами пучка накачки, кристалла PPMg:LN и резонатора, использованными для расчета наведенной тепловой линзы и радиуса пучка генерации ПГС (см. ниже).

Согласно расчетам, хорошее согласование моды резонатора ПГС и пучка накачки имело место при его радиусе ~190 мкм.

Логарифм поглощения за два прохода через нелинейный элемент $2\alpha L$.....0.4
Коэффициент теплопроводности (Вт·м$^{-1}$·K^{-1}).....4.4 [47]
Показатель преломления.....2.12
Термооптический коэффициент $\partial n/\partial T$ (K^{-1})....3.8×10^{-5} [48]
Длина резонатора (мм).....55
Фокусное расстояние наведенной тепловой линзы при мощности накачки 2 Вт (мм) (для радиуса пучка накачки – мкм)*.....22.4 (150)
36 (190)
Радиус пучка генерации и внути нелинейного элемента (мкм).....178–180
190–192

*Фокусное расстояние 22.4 мм соответствует радиусу пучка 178–180 мкм, 36 мм – радиусу 190–192 мкм.

При фокусировке линзой с эффективным фокусным расстоянием ~140 мм генерация излучения среднего ИК диапазона регистрировалась в диапазоне температур 410–420 K в продольной области нелинейного элемента PPMg:LN с периодом доменной структуры 30.0–30.1 мкм. Найденное положение и температура нелинейного элемента соответствовали оптимальному для вырожденной параметрической генерации периоду 30.04–30.05 мкм, рассчитанному с помощью программы SNLO при указанных температурах [49].

Максимум выходной мощности ПГС в среднем ИК диапазоне достигался при температуре 414–415 K и составлял 950 мВт, а энергия в импульсах была равна ~0.95 мДж (суммарно по сигнальной и холостой волнам) при средней мощности накачки 2.4 Вт (частота следования импульсов 1 кГц). Максимум импульсной энергии генерации (суммарно по сигнальной и холостой волнам) составил ~1.18 мДж при энергии импульсов накачки 2.7 мДж и частоте их следования 0.5 кГц, максимальная эффективность преобразования энергии составила ~43.5% (рис.6).

С помощью указанных выше фотоприемников регистрировались импульсы параметрической генерации в среднем ИК диапазоне и излучения накачки на входе или выходе нелинейного элемента. При максимальной мощности генерации длительность ее импульса была соизме-

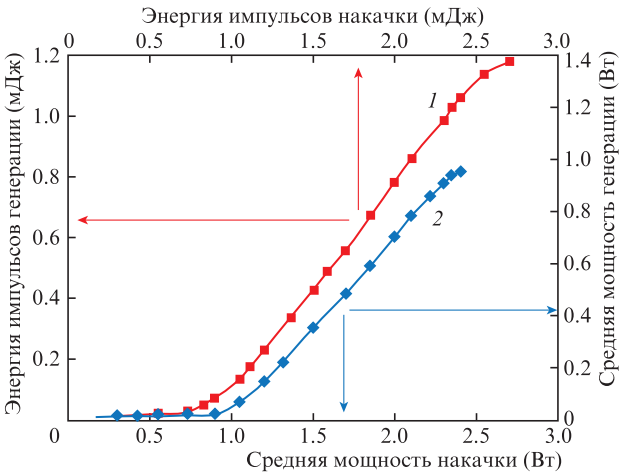

Рис.6. Зависимости энергии импульсов генерации ПГС (суммарно по сигнальной и холостой волнам) от энергии импульсов накачки (λ_p = 1941 нм) при частоте следования импульсов 0.5 кГц (*1*) и суммарной средней мощности генерации от средней мощности накачки при частоте следования импульсов 1 кГц (*2*).

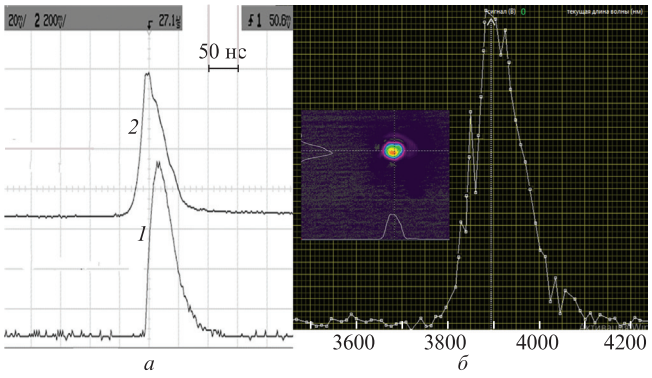

Рис.7. Осциллограммы импульса параметрической генерации (*1*) (после фильтра) и прошедшего через нелинейный кристалл импульса накачки (*2*) (*а*), а также спектр (в нм) генерации (*б*). Средняя мощность генерации ~0.95 Вт при частоте следования импульсов 1 кГц, стрелкой на рис.*б* показана длина волны вырождения параметрической генерации. На вставке – пучок генерации после фильтра, зарегистрированный камерой Pyrocam IV.

рима с длительностью импульса излучения Tm^{3+}:YAP-лазера на входе в кристалл (рис.7,*а*). Спектр параметрической генерации включал широкую линию (от ~3820 до ~3970 нм по полувысоте) с неоднородной структурой, изменяющейся от импульса к импульсу (рис.7,*б*). Генерация происходила вблизи «точки вырождения» (на длине волны 3882 нм). Зарегистрированный пучок генерации соответствовал одной поперечной моде резонатора ПГС – гауссову пучку с небольшими искажениями: определяемый «методом ножа» параметр качества пучка $M_x \leqslant 3$, $M_y \leqslant 2–2.5$ (вставка на рис.7,*б*). При максимальной мощности генерации в нелинейном элементе в области преобразования наблюдалось также слабое красное свечение.

4. Генерация второй гармоники

Предварительные оценки показали возможность удвоения частоты (генерации второй гармоники) излучения Tm^{3+}:YAP-лазера в том же нелинейном элементе PPMg:LN, но при другом периоде доменной структуры. Поэтому в следующем эксперименте зеркала, формирующие резонатор ПГС, были убраны и заменен фильтр прошедшего пучка, находящийся за нелинейным элементом. Новый фильтр выделял в прошедшем пучке излучение в диапазоне 940–1000 нм (использовалось диэлектрическое зеркало на подложке из кварца КУ, отражающее излучение на длине волны 1941 нм с коэффициентом $R > 99\%$ и пропускающее излучение в диапазоне 940–1000 нм с коэффициентом T ~96%). Прошедшее через фильтр излучение направлялось в спектроанализатор на основе монохроматора SOLAR и фотоприемника на основе модуля ФП 150 (АО «НИИ “Полюс”»). Для фокусировки пучка излучения Tm^{3+}:YAP-лазера в кристалл PPMg:LN использовалась линза с $f = 70$ мм, эффективное фокусное расстояние с учетом расходимости пучка было ~105 мм, диаметр пучка накачки в нелинейном элементе составлял 190–200 мкм, а расчетная рэлеевская длина фокальной перетяжки равнялась 14.4–16 мм. Положение линзы относительно кристалла PPMg:LN подстраивалось для достижения наилучшего нелинейно-оптического преобразования.

При предварительной настройке ГВГ нелинейный элемент (как и в эксперименте с ПГС) перемещался в поперечном направлении вдоль оси *Y*. Температура при каждом положении кристалла варьировалась в диапазоне 293–433 K. Индикатором настройки служило достижение наибольшей мощности излучения на длине волны ~970.5 нм на выходе монохроматора. Предварительная настройка показала наличие искомого излучения второй гармоники при прохождении пучка через область элемента PPMg:LN, противоположную использовавшейся в эксперименте с ПГС. По оценке, период решетки составлял 28.5–28.7 мкм, что соответствовало оптимальному периоду в 28.6 мкм при температуре ~410 K согласно SNLO. После предварительного нахождения положения элемента PPMg:LN осуществлялась дальнейшая подстройка его положения и температуры для увеличения мощности ГВГ.

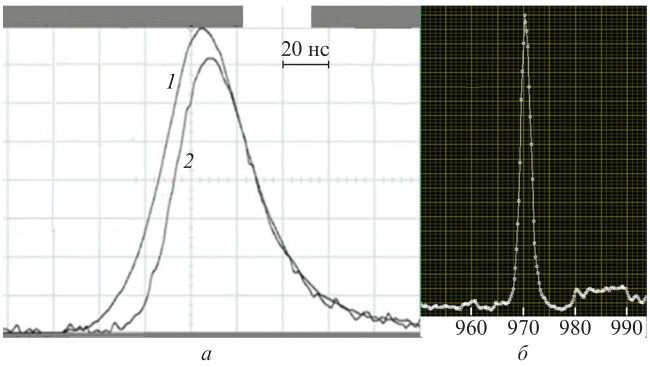

Рис.8. Осциллограммы импульсов накачки на $\lambda_p = 1941$ нм (*1*) и второй гармоники на $\lambda = 970.5$ нм (*2*) (*а*) и спектр (в нм) ГВГ(*б*).

Импульсы второй гармоники, регистрируемые фотоприемником, были немного короче импульсов накачки (рис.8,*а*). Спектр ГВГ содержал линию на ~970.5 нм (рис.8,*б*).

В результате оптимизации схемы энергия импульсов второй гармоники достигла 0.91 мДж при энергии импульсов накачки 2.7 мДж и частоте их следования 0.5 кГц (рис.9). Эффективность преобразования по энергии импульсов достигала ~34%. Пучок второй гармоники, зарегистрированный камерой Pyrocam IV после прохождения фильтра, имел форму, близкую к гауссовой: параметр качества пучка $M_x \leqslant 4$, $M_y \leqslant 3$ (рис.9).

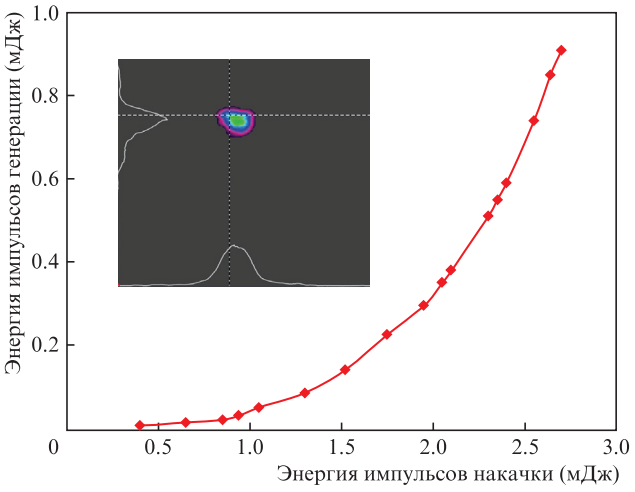

Рис.9. Зависимость энергии импульсов второй гармоники от энергии импульсов накачки при частоте их следования 0.5 кГц. На вставке – форма пучка второй гармоники после фильтра.

Следует отметить, что при оптимальной настройке наряду с ГВГ на выходе кристалла наблюдалось видимое излучение (свечение) красного, сине-зеленого и белого цветов, что можно объяснить генерацией суммарной частоты (накачка + вторая гармоника) и вторым каскадом ГВГ – генерацией 4-й гармоники и нелинейным преобразованием в более высокие гармоники. Наличием каскадного преобразования в более высокие гармоники можно объяснить ограничение роста выходной мощности второй гармоники.

5. Обсуждение результатов

Параметрическая генерация и ГВГ были реализованы при одной длине волны накачки, λ_p = 1941 нм, и в одном элементе, PPMg:LN, но при разных периодах спонтанной поляризации доменов в нем. Однако в предыдущих экспериментах с тем же элементом PPMg:LN, но с накачкой на длине волны 1967 нм, эффекты параметрической генерации и ГВГ заметно конкурировали [4]. Исследование температурной зависимости оптимального периода элемента PPMg:LN с помощью программы SNLO для вырожденной параметрической генерации и ГВГ показало, что при λ_p = 1941 нм эти нелинейно-оптические эффекты реализуются при различающихся периодах, а при λ_p = 1967 нм требуются более близкие или одинаковые периоды (рис.10).

Эффективные коэффициенты нелинейности d_{eff} для ГВГ и параметрической генерации при накачке на λ_p = 1941 и 1967 нм примерно одинаковы: ~14.9 и ~13.6 пм/В соответственно [49]. Коэффициенты линейного поглощения в кристалле PPMg:LN на длинах волн параметрической генерации в диапазоне 3880–3930 нм также мало различаются [14, 15]. Поэтому более сильную конкуренцию между параметрической генерацией и ГВГ при накачке на длине волны 1967 нм, чем при накачке на 1941 нм, можно объяснить именно близостью оптимального периода PPMg:LN для этих двух эффектов при более длинноволновой накачке.

Дальнейший рост мощности ПГС и ГВГ в кристалле PPMg:LN с накачкой на λ_p = 1941 нм возможен при увеличении мощности лазерных импульсов, например путем их укорочения. Однако увеличение мощности и плотности энергии лазерных импульсов ограничивается оптическим пробоем элементов как самого лазера, так и нелинейно-оптического кристалла (особенно при генерации видимого света в PPMg:LN [4]). Улучшение оптического качества кристалла PPMg:LN и использование структуры с фиксированным периодом также должно позволить увеличить эффективность нелинейно-оптических преобразований.

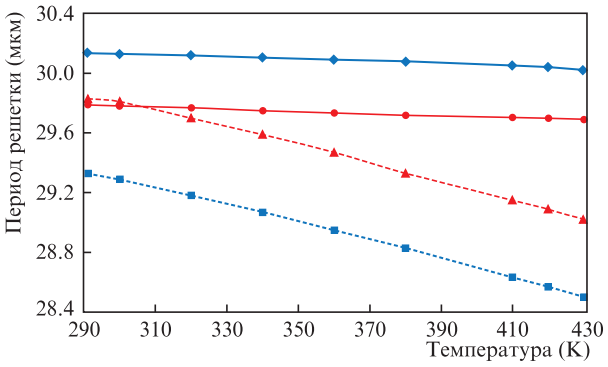

Рис.10. Зависимости оптимального периода элемента PPMg:LN с регулярной доменной структурой от температуры для параметрической генерации в вырожденном режиме (сплошные линии) и для ГВГ (штриховые линии) при длинах волн накачки 1941 (синие линии) и 1967 нм (красные линии).

Использование излучения накачки в диапазоне длин волн 1985–1992 нм может привести к ограничению мощности и энергии ПГС из-за роста поглощения пучков генерации в кристалле PPMg:LN на длинах волн более 4 мкм [14, 15]. Однако уменьшение длины волны генерации Tm^{3+}:YAP- лазера (до 1890–1897 нм) может снизить порог пробоя элементов лазера и привести к тепловым искажениям пучка накачки из-за роста поглощения паров воды в этом спектральном диапазоне [50].

6. Заключение

Суммируя результаты проведенных исследований, отметим, что импульсно-периодическое излучение Tm^{3+}:YAP-лазера на длине волны 1941 нм может служить эффективной накачкой для ПГС на кристаллах PPMg:LN, которые позволяют в вырожденном режиме получать генерацию в среднем ИК диапазоне длин волн 3820–3970 нм. В этом же кристалле, но при другом периоде доменной структуры, удается реализовать ГВГ лазерного излучения на длине волны 1941 нм и получить мощный пучок когерентного излучения на длине волны 970.5 нм.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (в рамках госзадания ИПФ РАН, проект №0030-2021-0012, и госзадания НГУ, проект FSUS 2020-0036) и РНФ (проект №19-12-00085) с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ (рег. №2968).

1. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P. *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* (Croatia: InTech, 2010, pp. 471–500).
2. Vodopyanov K.L. *Laser-based Mid-infrared Sources and Applications* (Wiley, USA: 2020, p. 287).
3. Xu L., Liang S., Fu Q., Shepherd D.P., Richardson D. J., Alam S. *Appl. Phys. B*, **124** (59), 44 (2018).
4. Antipov O., Kolker D., Kal'yanov D., Larin S., Shur V., Akhmathanov A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **35** (7), 1674 (2018).
5. Budni P.A., Pomeranz L.A., Lemons M.L., Miller C.A., Mosto J.R., Chicklis E.P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **17**, 723 (2000).
6. Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Шарков В.В., Савикин А.П., *Квантовая электроника*, **40** (2), 98 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (2), 98 (2010)].
7. Antipov O.L., Kositsyn R.I., Eranov I.D. *Laser Phys. Lett.*, **14** (1), 015002 (2017).
8. Zhao Ben-Rui, Yao Bao-Quan, Qian Chuan-Peng, Liu Gao-You, Chen Yi, Wang Rui-Xue, Dai Tong-Yu, Duan Xiao-Ming. *Opt. Lett.*, **43** (24), 5989 (2018).
9. Haakestad M.W., Fonnum H., Lippert E. *Opt. Express*, **22** (7), 8556 (2014).
10. Liu G., Mi S., Yang K., Wei D., Li J., Yao B., Yang C., Dai T., Duan X., Tian L., Ju Y. *Opt. Lett.*, **46** (1), 82 (2021).
11. Schunemann P.G., Zawilski K.T., Pomeranz L.A., Creeden D.J., Budni P.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **33** (11), D36 (2016).
12. Zawilski K.T., Setzler S.D., Schunemann P.G., Pollak T.M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **23**, 2310 (2006).
13. Юдин Н.Н., Антипов О.Л., Грибенюков А.И., Еранов И.Д., Подзывалов С.Н., Зиновьев М.М., Воронин Л.А., Журавлева Е.В., Зыкова М.П. *Квантовая электроника*, **51** (4), 306 (2021) [*Quantum Electron.*, **51** (4), 306 (2021)].
14. Myers L.E., Eckardt R.C., Fejer M.M., Byer R.L., Bosenberg W. R., Pierce J.W. *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 2102 (1995).
15. Hum D.S., Fejer M.M. *Compt. Res. Phys.*, **8**, 180 (2007).

16. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Физматлит, 2004, гл. VII, с. 366).
17. Petrov V. *Opt. Mater.*, **34** (3), 536 (2012).
18. Shen Y., Alam S., Chen K.K., Lin D., Cai S., Wu B., Jiang P., Malinowski A., Richardson D.J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15** (2), 385 (2009).
19. Adler F., Cossel K.C., Thorpe M.J., Hartl I., Fermann M.E., Ye J. *Opt. Lett.*, **34** (9), 1330 (2009).
20. Wu B., Kong J., Shen Y. *Opt. Lett.*, **35** (8), 1118 (2010).
21. Chaitanya Kumar S., Das R., Samanta G.K., Ebrahim-Zadeh M. *Appl. Phys. B*, **102** (1), 31 (2011).
22. Lin D., Alam S., Shen Y., Chen T., Wu B., Richardson D.J. *Opt. Express*, **20** (14), 15008 (2012).
23. He Y., Ji Y., Wan H., Yu D., Zhang K., Pan Q., Sun J., Chen Y., Chen F. *Opt. Laser Technol.*, **146**, 107545 (2022).
24. Larionov I.A., Gulyashko A.S., Alekseev D.A., Tyrtyshnyy V.A., in *Techn. Digest Intern. Conf. Laser Opt.*, 2020 (on-line), TuSYA-13.
25. Honea E., Savage-Leuchs M., Bowers M.S., Yimaz T., Mead R. *Proc. SPIE*, **8601**, 860111 (2013).
26. Creeden D., Blanchard J., Pretorius H., Limongelli J., Setzler S. *Proc. SPIE*, **9728**, 972829 (2016).
27. Xu L., Liang S., Fu Q., Shepherd D.P., Richardson D.J., Alam S. *Appl. Phys. B*, **124** (59) (2018).
28. Hansson G., Smith D.D. *Appl. Opt.*, **37**, 5743 (1998).
29. Hansson G., Smith D.D. *Opt. Lett.*, **25**, 1783 (2000).
30. Bao Z.X., Yao B.Q., Ju Y.L., Wong Y.Z. *Chines Phys. Lett.*, **24**. 1953 (2007).
31. Колкер Д.Б., Антипов О.Л., Ларин С.В., Исаенко Л.И., Веденяпин В.Н., Ахматханов А.Р., Шур В.Я. *Оптика атмосферы и океана*, **32** (8), 669 (2019).
32. Cole B., Goldberg L., Hays A.D. *Opt. Lett.*, **43** (2), 170 (2018).
33. Cole B., Goldberg L., Chinn S., Pomeranz L.A., Zawilski K.T., Schunemann P.G., McCarthy J. *Opt. Lett.*, **43** (5), 1099 (2021).
34. Mi S., Li J., Wei D., Yang K., Yang C., Yao B., Duan X., Dai T. *Opt. Laser Technol.*, **138**, 106847 (2021).
35. Kalachev Yu.L., Mihailov V.A., Podreshetnikov V.V., Shcherbakov I.A. *Opt. Commun.*, **284** (13), 3357 (2011).
36. Antipov O., Novikov A., Larin S., Obronov I. *Opt. Lett.*, **41**, 2298 (2016).
37. Antipov O.L., Getmanovskiy Yu.A., Dobrynin A.A., Huang H.T., Shen D.Y., Wang J., Balabanov S.S. *Appl. Phys. B*, **127** (77) (2021).
38. Larin S., Antipov O., Sypin V., Vershinin O. *Opt. Lett.*, **39** (11), 3216 (2014).
39. Diehl R., Brandt G. *Mater. Res. Bull.*, **10** (2), 85 (1975).
40. Antipov O.L., Getmanovskiy Yu.A., Dobrynin A.A., Shestakova I.A., Shestakov A.V., Balabanov S.S., Larin S.V. in *Techn. Digest CLEO/ Europe 2021* (on-line), CA-P.17.
41. Antipov O.L., Getmanovskiy Yu.A., Balabanov S.S., Larin S.V., Sharkov V.V. *Laser Phys. Lett.*, **18**, 055001 (2021).
42. www.rezonator.orion-project.org.
43. Aggarwal R.L., Ripin D.J., Ochoa J.R., Fan T.Y. *J. Appl. Phys.*, **98** (10), 103514 (2005).
44. ISO 11146-1:2005, *Lasers and laser-related equipment -Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios*.
45. Powers P.E., Kulp Th.J., Bisson S.E. *Opt. Lett.*, **23** (3), 159 (1998).
46. Shur V.Ya., Akhmatkhanov A.R., Baturin I.S. *Appl. Phys. Rev.*, **2**, 40604 (2015).
47. Ren T., Wu Ch., Yu Y., Dai T., Chen F., Pan Q. *Appl. Sci.*, **11**, 11451 (2021).
48. Paul O., Quosig A., Bauer T., Nittmann M., Bartschke J., Anstett G.,L, Huillier J.A. *Appl. Phys. B*, **86** (1), 111 (2006).
49. www.snlo.com.
50. www.hitran.iao.ru.