

# Широкополосный источник излучения среднего ИК диапазона на основе параметрического генератора света с MgO:PPLN-структурой

Д.Б.Колкер, И.В.Шерстов, Н.Ю.Костюкова, А.А.Бойко, Е.Ю.Ерушин, Б.Н.Нюшков

*Разработан и испытан широкополосный параметрический генератор света (ПГС) в спектральном диапазоне 2.6–4.2 мкм на основе структуры PPLN fan-out с накачкой Nd:YAG-лазером (1.064 мкм) с модуляцией добротности. В оптической схеме ПГС использован цилиндрический расширитель пучка накачки для увеличения эффективной апертуры PPLN-структуры с целью получения широкополосной генерации.*

**Ключевые слова:** параметрический генератор света, структура MgO:PPLN.

## 1. Введение

Средний ИК диапазон (2–14 мкм) представляет большой интерес для различных применений. В нем расположены фундаментальные колебательно-вращательные полосы поглощения различных газов, что позволяет проводить дистанционный [1, 2] или локальный газоанализ атмосферы [3, 4] с помощью лазеров с соответствующими длинами волн. Поглощение паров воды в атмосфере существенно ограничивает спектральные области, в которых лазерное излучение проходит через открытую атмосферу. Главные окна прозрачности атмосферы расположены в диапазонах 3–5 мкм и 8–12 мкм. Кроме паров воды, ограничения на распространение лазерного излучения вносит также атмосферный углекислый газ, который имеет сильные широкие полосы поглощения с центрами вблизи 4.3 и 14 мкм.

В спектральном диапазоне 8–12 мкм для различных целей (в том числе для газоанализа атмосферы) традиционно используются перестраиваемые CO<sub>2</sub>-лазеры, которые излучают на различных колебательно-вращательных переходах в интервале 9.2–10.8 мкм [5, 6]. В диапазоне 3–5 мкм широко применяются параметрические генера-

торы света (ПГС), квантово-каскадные лазеры (ККЛ) и др. Разработка мощных лазерных источников в указанном диапазоне представляет большой интерес для создания ИК систем противодействия [7, 8].

Для некоторых применений требуются мощные широкополосные источники излучения среднего ИК диапазона типа лазерного глобара. Одним из вариантов построения такого источника является ПГС на основе периодически поляризованных структур в аperiodической или веерной (fan-out) [9] геометрии (рис. 1).

В работе [10] для получения широкого спектра генерации в диапазоне 3–4 мкм была использована периодически поляризованная структура из ниобата лития (PPLN) с аperiodической конфигурацией (рис. 1, а) и накачкой фемтосекундным излучением. В [11, 12] использование в качестве нелинейного элемента ПГС веерной PPLN-структуры (рис. 1, б) и узкого пучка накачки (1.053 мкм) позволило реализовать плавную перестройку длины волны излучения в диапазоне 2.5–4.5 мкм [12] при поперечном смещении структуры относительно оси резонатора ПГС. Такой излучатель применялся в медицинском лазерном оптико-акустическом газоанализаторе [13] для контроля газового состава выдоха пациентов в клинике [14].

PPLN-структуры с накачкой одномикронным излучением широко применяются для параметрического преобразования длины волны в спектральный диапазон 2.1–4.2 мкм (холостая волна) [15]. Основное ограничение использования PPLN-структур для генерации излучения среднего ИК диапазона повышенной мощности – достаточно низкий порог пробоя ниобата лития (~100 МВт/см<sup>2</sup>). В работе [16] описан ПГС на основе PPLN-структуры с накачкой излучением Nd:YVO<sub>4</sub>-лазера (1.064 мкм), на выходе которого получена максимальная средняя мощность излучения 9.23 Вт на холостой волне (3.82 мкм).

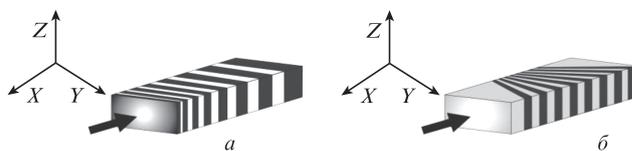


Рис. 1. Строение периодически поляризованных структур – аperiodической (а) и веерной (б).

**Д.Б.Колкер.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 156; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 16; Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630072, Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: kolker@ngs.ru

**И.В.Шерстов, Н.Ю.Костюкова, А.А.Бойко.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 156; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 16

**Е.Ю.Ерушин.** Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630072, Новосибирск, просп. К.Маркса, 20

**Б.Н.Нюшков.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 156; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 16; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630072, Новосибирск, просп. К.Маркса, 20

Поступила в редакцию 24 октября 2018 г., после доработки – 18 декабря 2018 г.

Цель настоящей работы – исследование ПГС среднего ИК диапазона (2.6–4.2 мкм) с широким спектром излучения при использовании широкоапертурной PPLN-структуры веерной конфигурации.

## 2. Экспериментальная установка

Для генерации трехмикронного излучения повышенной средней мощности (10 Вт и выше) необходимо увеличить рабочую апертуру PPLN-структуры и использовать более высокие значения энергии (мощности) излучения накачки. В работе [17] для увеличения мощности при снижении интенсивности накачки и предохранения PPLN-структуры от пробоя применялся пучок накачки эллиптической формы.

В настоящей работе для генерации широкополосного ИК излучения в диапазоне 2.6–4.2 мкм используется ПГС на основе структуры MgO:PPLN fan-out (рис. 1, б) с широкой апертурой (3 × 20 мм), накачиваемый излучением Nd:YAG-лазера (1.064 мкм). Блок-схема ПГС представлена на рис. 2. Основная идея, заложенная в данную оптическую схему ПГС для генерации широкополосного ИК излучения, заключается в одновременной накачке различных участков апертуры структуры с разными периодами при использовании цилиндрического расширителя пучка излучения накачки перед входом в резонатор ПГС.

Периодически поляризованные структуры из ниобата лития в силу технологических особенностей их изготовления (высокие коэрцитивные поля) могут иметь толщину не более 3–5 мм. Оптический пробой MgO:PPLN-структуры возникает при достаточно низкой (~1 Дж/см<sup>2</sup>) плотности энергии при длительности импульса ~10 нс. Этот фактор является ограничивающим при фокусировке излучения накачки. Однако при использовании широкой апертуры MgO:PPLN-структуры (в нашем случае 3 × 20 мм) площадь пучка накачки может быть увеличена более чем в 6–10 раз. Таким образом, применение полосковой структуры нелинейного элемента и такого же сечения пучка накачки позволяет увеличить энергию (мощность) импульсов накачки без риска оптического пробоя нелинейного элемента, а также увеличить в несколько раз

мощность (энергию) преобразованного ИК излучения по сравнению с классическими системами, использующими пучки накачки круглого сечения.

В экспериментах использовалась структура MgO:PPLN fan-out (Labfer, Ltd., Россия) [18] с размерами 3 × 20 × 50 мм, ее период по ширине (координата  $Y$ ) плавно изменялся в диапазоне 27.42–32.5 мкм. На полированные торцы структуры нанесено просветляющее покрытие с центром на 1.5 мкм. Структура размещена на прецизионной моторизированной платформе линейного перемещения (Standa), обеспечивающей плавное поперечное смещение структуры относительно оси  $Y$  резонатора ПГС. Подобная структура MgO:PPLN fan-out была использована в [12] для создания комбинированного ПГС с плавной спектральной перестройкой в диапазоне 2.5–4.5 мкм. Ранее [11, 12] было установлено, что оптимальная длина структуры MgO:PPLN fan-out должна составлять 40–50 мм.

В качестве источника накачки использовался импульсно-периодический Nd:YAG-лазер LQ 215 (1.064 мкм) с модуляцией добротности. Лазер излучает импульсы с энергией от 20 до 180 мДж с частотой следования 20 Гц, длительность импульсов составляет ~6 нс. Диаметр пучка на выходе лазера примерно равен 8 мм при параметре качества пучка  $M^2 \approx 2.5$ .

В оптической схеме ПГС (см. рис. 2) применены два линзовых телескопа. Первый образован сферическими линзами Л1 ( $f = 174$  мм) и Л2 ( $f = -111$  мм) и предназначен для формирования пучка накачки диаметром ~2.8 мм. В этом варианте ПГС работал как в [12]. Второй телескоп, образованный цилиндрическими линзами Л3 ( $f = -50$  мм) и Л4 ( $f = 300$  мм), предназначался для расширения пучка излучения накачки по горизонтальной координате  $Y$  в шесть раз, без изменения размера по вертикальной координате  $Z$ . В результате для накачки могла использоваться практически вся апертура структуры (3 × 20 мм).

В эксперименте была реализована схема однорезонаторного ПГС на сигнальной волне с двухпроходной накачкой. Входным/выходным зеркалом ПГС служило плоское зеркало 35 на подложке из ZnSe с высоким коэффициентом пропускания на 1.064 мкм ( $T \approx 99\%$ ) и в диапазоне 2–12 мкм ( $T \approx 85\%–90\%$ ), а также с коэффициентом отражения для сигнальной волны (1.15–1.8 мкм) около 90%. Заднее отражающее зеркало 36 имело золотое покрытие, нанесенное на плоскую кремниевую подложку. Для вывода холостой волны в схеме использовалось дихроичное зеркало 34 с высоким коэффициентом отражения ( $R \approx 99.9\%$ ) в области 1.064 мкм и высоким коэффициентом пропускания в спектральном диапазоне 2–4 мкм.

Излучение холостой и сигнальной волн, полученное в результате параметрического преобразования в данной MgO:PPLN-структуре, выходит из резонатора широким пучком эллиптической формы через зеркало 35, а затем проходит через дихроичное зеркало 34. Далее для фильтрации холостой волны (при измерении энергии (мощности)) в схеме использован фильтр Ф с высоким пропусканием (~90%) в спектральном диапазоне 2–4 мкм и высоким отражением (~99%) в области 1.3–1.8 мкм.

Для измерения мощности (энергии) импульсов излучения Nd:YAG-лазера накачки небольшая часть пучка накачки (4.4%) отражалась зеркалом 31 (плоской кварцевой пластиной, установленной под углом 45°) на измеритель мощности ИМ Thorlabs PM100D/ES120C. При измерении энергии (мощности) импульсов излучения холо-

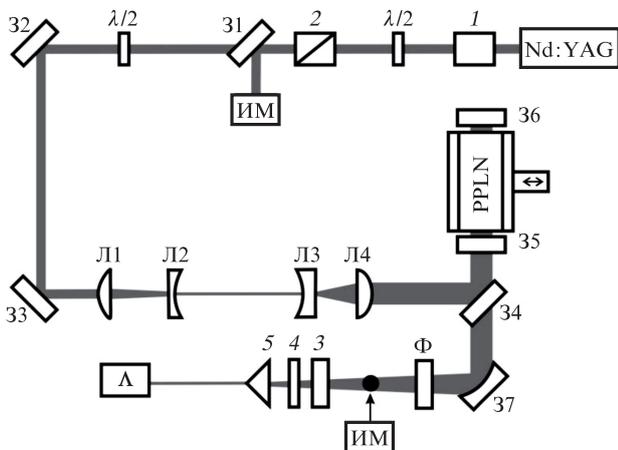


Рис. 2. Оптическая схема ПГС:

Nd:YAG – лазер накачки;  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка; 31–37 – зеркала; ИМ – измеритель энергии (мощности); Л1, Л2 – сферические линзы; Л3, Л4 – цилиндрические линзы; PPLN – широкоапертурная структура MgO:PPLN fan-out; Ф – фильтр; Λ – спектрометр; 1 – оптический изолятор Фарадея; 2 – поляризатор; 3 – ослабитель; 4 – рассеиватель; 5 – коллиматор.

стой волны ПГС тот же измеритель мощности перемещался в положение после фильтра  $\Phi$  (показано точкой на рис.2).

Спектральные параметры холостой/сигнальной волны измерялись подключенным к компьютеру спектрометром NIRQuest512. Излучение вводилось в спектрометр с помощью коллиматора и оптоволокну (при этом фильтр  $\Phi$  не использовался). Для предотвращения повреждения спектрометра дополнительно были установлены ослабитель и рассеиватель (см. рис.2). На мониторе компьютера отображалось действующее значение сигнальной длины волны излучения ПГС, по которому затем определялась холостая длина волны.

### 3. Экспериментальные результаты

В начале экспериментов проводилось картирование используемой  $\text{MgO:PPLN}$ -структуры, как описано в работе [19], с целью определения распределения интенсивности холостой волны излучения ПГС по всей апертуре структуры (рис.3). Картирование осуществлялось путем сканирования структуры в плоскости  $YZ$  (перпендикулярно оси резонатора) с шагом 0.2 мм при помощи двух однокоординатных линейных моторизованных платформ Standa, управляемых компьютером. При картировании цилиндрический расширитель пучка не использовался, а излучение накачки фокусировалось в структуру вспомогательной линзой ( $f = 100$  мм) для получения на входе в структуру пучка диаметром  $\sim 0.5$  мм. Всего на карту распределения интенсивности холостой волны ПГС (см. рис.3) нанесено  $\sim 1000$  точек. Максимальная эффективность преобразования излучения накачки в холостую волну соответствует максимальной квантовой эффективности  $\eta = 17.7\%$ , поэтому шкала интенсивностей, приведенная на рисунке, нормирована на это значение.

Как видно из рис.3, имеет место крайне неравномерное распределение интенсивности холостой волны излучения ПГС. Наибольшая интенсивность наблюдается вблизи левого края исследуемой структуры, где период структуры максимален ( $\sim 32.5$  мкм), а длина холостой волны составляет  $\sim 3$  мкм. При смещении пучка накачки вправо период структуры уменьшается до 27.42 мкм, при этом длина холостой волны увеличивается примерно до 4 мкм. Снижение интенсивности холостой волны при смещении пучка накачки слева направо связано со снижением эффективности параметрического преобразования в исследуемой  $\text{MgO:PPLN}$ -структуре из-за увеличения длины холостой волны. Изменение длины волны с 3 до 4.2 мкм (на 40%) уменьшает эффективность преобразования в 1.7 раза, однако результаты, представленные на рис.3, показывают существенно большее уменьшение (почти на порядок), что может быть объяснено спектральным пропусканьем  $\text{MgO:PPLN}$ -структуры [18], а также спецификой диэлектрических покрытий зеркал резонатора ПГС.

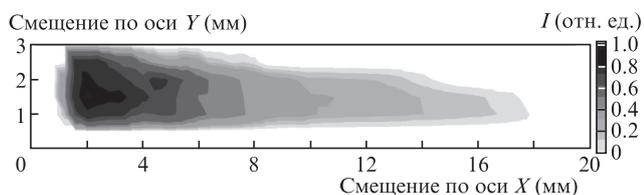


Рис.3. Карта распределения интенсивности холостой волны излучения ПГС по апертуре структуры  $\text{MgO:PPLN fan-out}$ .

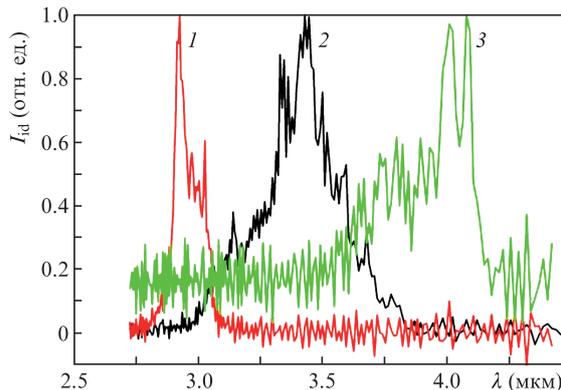


Рис.4. Спектры излучения холостой волны  $I_{id}$  ПГС при различных поперечных положениях широкоапертурной структуры  $\text{MgO:PPLN fan-out}$ .

На рис.4 представлены экспериментальные спектры холостой волны ПГС, записанные при использовании цилиндрического расширителя пучка накачки. При этом апертура дихроичного зеркала  $\mathcal{Z}_4$ , установленного под углом  $45^\circ$ , не позволила использовать всю ширину (20 мм) структуры, установленной в резонаторе ПГС. Горизонтальная ширина пучка накачки на входе в резонатор ПГС составила  $\sim 14$  мм, поэтому в эксперименте удалось накачать лишь некоторые части апертуры структуры.

Показанные на рис.4 спектры излучения холостой волны ПГС получены при трех поперечных положениях структуры относительно оси резонатора. Кривая 1 соответствует крайнему левому положению структуры согласно карте на рис.3, когда реализуется наиболее эффективное параметрическое преобразование с длиной холостой волны  $\sim 3$  мкм. Кривые 2 и 3 соответствуют центральному и крайнему правому положениям структуры. Наибольшая энергия (мощность) импульсов излучения холостой волны зафиксирована для спектральной кривой 1 с центром вблизи 3 мкм. Спектральная кривая 3 с центром около 4 мкм имеет наименьшую интенсивность, поэтому при нормировке ее шумовая дорожка заметно отличается от других кривых. Ширина спектра на полувысоте для кривой 1 составляет  $\sim 150$  нм, для кривой 2 (с центром на 3.5 мкм) – около 300 нм. Заметим, что сильные сферические aberrации в цилиндрических линзах приводят к перераспределению интенсивности света вдоль линии излучения, снижая ее в центре линии и увеличивая на краях. Отметим также, что использование линз Пауэлла вместо цилиндрических линз в данной оптической схеме позволит получить более однородное распределение интенсивности накачки вдоль линии излучения.

На рис.5 приведена экспериментальная зависимость средней мощности излучения холостой волны ПГС от мощности накачки, соответствующая спектральной кривой 1 на рис.4. Максимальное значение средней мощности излучения холостой волны достигало 0.206 Вт при мощности накачки 1.679 Вт, что соответствует эффективности преобразования 12.3%. Квантовая эффективность составила 34.68%, дифференциальная эффективность – 11.7%. Видно, что данная зависимость практически линейная со слабой предрасположенностью к насыщению при мощности накачки вплоть до 1.7 Вт; это позволяет сделать вывод, что при плотности энергии, превышающей пороговую в 17 раз, истощение накачки еще не достигается.

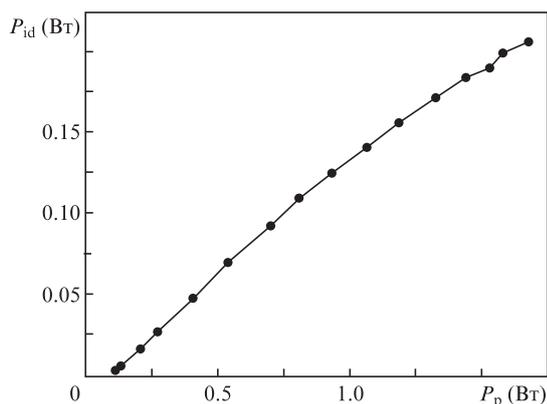


Рис.5. Зависимость средней мощности излучения холостой волны  $P_{id}$  ПГС (с центром спектра около 3 мкм) от мощности накачки  $P_p$ .

Максимальное значение выходной энергии импульсов ПГС соответствует плотности энергии накачки  $0.21 \text{ Дж/см}^2$ , что в 4.76 раза ниже порога пробоя PPLN-структуры. Поэтому энергию импульсов накачки можно увеличить примерно в 4.5 раза, что будет соответствовать 78-кратному превышению порога генерации ПГС. Обычно при использовании PPLN-структуры в однорезонаторной схеме ПГС с двухпроходной накачкой плотность энергии накачки составляет не более 70% от плотности энергии пробоя кристалла. В настоящем эксперименте с широкоапертурной PPLN-структурой плотность энергии накачки (1.064 мкм) была в 5–6 раз ниже, чем в экспериментах, использующих традиционные пучки накачки с круглым сечением. Это означает, что существует возможность увеличения энергии (мощности) накачки и повышения плотности энергии до значений, соизмеримых с теми, которые использовались в экспериментах, описанных в работе [19].

Необходимо отметить, что для увеличения энергии импульсов излучения холостой волны в качестве нелинейного элемента ПГС могут быть использованы периодические структуры РРКТР или РРКТА, у которых порог пробоя значительно выше ( $\sim 1 \text{ ГВт/см}^2$ ), чем у ниобата лития. При этом РРКТР-структуры могут работать в ПГС с одномикронной накачкой до длины волны излучения  $\sim 3.3 \text{ мкм}$ , а РРКТА-структуры – примерно до 5 мкм [20]. Отметим, что эффективная нелинейность PPLN-структур составляет 14.2 пм/В, РРКТР – 10.8 пм/В, а РРКТА – 10.3 пм/В [20].

#### 4. Заключение

Использование ПГС с полосковой структурой нелинейного элемента и цилиндрическим расширителем пучка накачки позволяет увеличить среднюю мощность преобразователей частоты лазерного излучения из ближнего в средний ИК диапазон в несколько раз по сравнению с системами, в которых используются пучки накачки круглого сечения. При этом снижение лучевой нагрузки на нелинейный элемент происходит за счет увеличения эффективной апертуры элемента, что повышает надежность системы и увеличивает срок эксплуатации ПГС.

Применение структуры PPLN fan-out в качестве нелинейного элемента позволяет реализовать мультиспектральные ПГС в области 2.6–4.2 мкм, в которых возможна одновременная генерация широкого спектра частот в среднем ИК диапазоне (типа лазерного глобара) при накачке всей апертуры нелинейного элемента. При использовании линз Пауэлла вместо цилиндрических линз расширителя пучка накачки может быть достигнуто более равномерное распределение интенсивности накачки по всей апертуре кристалла, что приведет к повышению средней мощности в спектральном диапазоне 2.6–4.2 мкм.

Для увеличения энергии импульсов излучения холостой волны в качестве нелинейного элемента могут быть использованы периодические структуры РРКТР или РРКТА, у которых порог пробоя ( $\sim 1 \text{ ГВт/см}^2$ ) значительно выше, чем у ниобата лития.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-12-00188).

1. *Лазерный контроль атмосферы*. Под ред. Э.Д.Хинкли (М.: Мир, 1979).
2. Иващенко М.В., Шерстов И.В. *Квантовая электроника*, **30** (8), 747 (2000) [*Quantum Electron.*, **30** (8), 747 (2000)].
3. Пономарев Ю.Н., Агеев Б.Г., Зигрист М.В., Капитанов В.А., Куртуа Д., Никифорова О.Ю. *Лазерная оптико-акустическая спектроскопия межмолекулярных взаимодействий в газах*. Под ред. Л.Н.Синицы (Томск: МГП «РАСКО», 2000).
4. Шерстов И.В., Капитанов В.А., Агеев Б.Г., Карапузиков А.И., Пономарев Ю.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **17** (2-3), 119 (2004).
5. Karapuzikov A.I., Malov A.N., Sherstov I.V. *Infrared Phys. & Technology*, **41** (2), 77 (2000).
6. Шерстов И.В., Бычков К.В., Васильев В.А., Карапузиков А.И., Спицын В.В., Черников С.Б. *Оптика атмосферы и океана*, **18** (3), 270 (2005).
7. Lippert E. *Proc. SPIE*, **8187**, 81870F (2011); doi: 10.1117/12.903735.
8. Xiaojun Xua, Xiao Lia, Lei Liua, Yaping Shanga. *Proc. SPIE*, **9255**, 925507-1 (2015); doi: 10.1117/12.2066963.
9. <http://www.hcphotonics.com>.
10. Mayer B.W., Phillips C.R., Gallmann L., Keller U. *Opt. Express*, **22** (17), 20808 (2014); doi: 10.1364/OE.22.020798.
11. Колкер Д.Б., Бойко А.А., Духовникова Н.Ю., Зенов К.Г., Шерстов И.В., Старикова М.К., Мирошниченко И.Б., Мирошниченко М.Б., Каштанов Д.А., Кузнецова И.Б., Штыров М.Ю., Zachariadis S., Карапузиков А.И., Карапузиков А.А., Локонов В.Н. *ИТЭ*, № 1, 85 (2014).
12. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В. *Квантовая электроника*, **47** (1), 14 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (1), 14 (2017)].
13. Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Karapuzikov A.I., Shtyrov M.Y., Dukhovnikova N.Y., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Tikhonyuk I.I., Miroshnichenko I.B., Miroshnichenko M.B., Kolker D.B., Myakishev Y.B., Lokonov V.N., Kistenev Y.V., Kuzmin D.D. *Phys. Wave Phenomena*, **22** (3), 189 (2014).
14. Kistenev Y.V., Bukreeva E.B., Bulanova A.A., Kuzmin D.A., Karapuzikov A.I., Kostyukova N.Y., Starikova M.K., Boyko A.A., Kolker D.B., Zenov K.G., Karapuzikov A.A. *J. Biomed. Opt.*, **20** (6), 065001 (2015).
15. Myers L.E., Eckardt R.C., Fejer M.M., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **12** (11), 2102 (1995).
16. Wu B., Kong J., Shen Y. *Opt. Lett.*, **35** (8), 1118 (2010).
17. Peng Y., Wang W., Wei X., et al. *Opt. Lett.*, **34** (19), 2897 (2009); doi: 10.1364/OL.34.002897.
18. <http://labfer.com/>.
19. Kolker D., Pronyushkina A., et al. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **793** (1), 012014 (2017).
20. <http://www.as-photonics.com/index.php>.