

# Энергетические и спектральные характеристики параметрического генератора на базе нелинейного кристалла $ZnGeP_2$ с накачкой излучением Но:YAG-лазера

А.И.Грибенюков, С.М.Ватник, В.В.Демин, С.Н.Подзывалов, И.Г.Половцев, Н.Н.Юдин

*Экспериментально реализованы средняя мощность генерации параметрического генератора (ПГ) на основе монокристалла  $ZnGeP_2$ , составившая  $\sim 1.5$  Вт, и КПД, равный  $\sim 28.6\%$  в диапазоне длин волн  $3.5-4.8$  мкм при средней мощности излучения накачки  $\sim 5.5$  Вт и плотности его энергии  $\sim 0.47$  Дж/см<sup>2</sup>. Показано, что существуют пороговые условия по средней мощности излучения накачки для реализации параметрической генерации. При этом рост эффективности генерации наблюдается с увеличением плотности энергии излучения накачки до  $\sim 0.4$  Дж/см<sup>2</sup>, а при дальнейшем ее увеличении выходная мощность растет за счет уменьшения порога параметрической генерации. Параметрические генераторы на основе монокристаллов  $ZnGeP_2$  с указанными характеристиками являются перспективными для решения многих прикладных задач, в том числе для генерации терагерцевого излучения при накачке нелинейных кристаллов излучением таких ПГ на разностной частоте.*

**Ключевые слова:** параметрическая генерация,  $ZnGeP_2$ , нелинейные кристаллы, излучение среднего ИК диапазона.

## 1. Введение

Источники когерентного излучения среднего ИК диапазона ( $\lambda = 3-8$  мкм) широко применяются сегодня во многих областях науки и техники, в том числе для обработки стекол, керамики, полупроводниковых материалов с использованием технологий термораскола и скрайбирования [1, 2]. Мощные источники лазерного излучения с дискретным набором длин волн и/или их плавной перестройкой по спектральному диапазону представляют значительный интерес для зондирования атмосферы и дистанционного определения состава веществ [3, 4], мониторинга экологической обстановки и определения размеров мелкодисперсных объектов [5, 6]. Импульсные и импульсно-периодические лазеры среднего ИК диапазона с энергией в импульсе до 1 мДж и его длительностью 10–100 нс имеют большой потенциал медицинских приложений, включая резонансную абляцию костных тканей [7–12] и малоинвазивную хирургию глаза [13, 14].

Перестраиваемые в диапазоне длин волн 3–8 мкм лазерные излучатели [15, 16] представляют особый интерес для реализации высокоэффективной генерации терагерцевого (ТГц) излучения в диапазоне частот 0.1–2 ТГц со средней выходной мощностью до 10 мВт. Для создания компактных источников ТГц излучения, работающих по принципу генерации разностной частоты в нелинейно-

оптических кристаллах (в том числе  $ZnGeP_2$ ), необходимы перестраиваемые узкополосные двухчастотные излучатели с длиной волны 3–4 мкм, подобные разработанным для накачки кристаллов GaSe [17]. Одним из наиболее эффективных способов получения когерентного излучения, соответствующего требованиям указанных выше приложений, является использование параметрического генератора (ПГ) с набором селектирующих элементов, сужающих полосу генерации.

Для реализации эффективной генерации ПГ необходимо использовать кристаллы, обладающие высокой оптической прозрачностью в заданном диапазоне длин волн, большой квадратичной нелинейной восприимчивостью, высоким порогом оптического пробоя и хорошей пространственной однородностью. Одним из наиболее приемлемых для параметрической генерации (по совокупности характеристик) является монокристалл  $ZnGeP_2$  [13, 18]. Коэффициент поглощения этого монокристалла в спектральном диапазоне 2.5–8.3 мкм не превышает  $0.1 \text{ см}^{-1}$  [19]. В диапазоне длин волн излучения, генерируемого твердотельными лазерами ( $\lambda = 2.05-2.39$  мкм), коэффициент поглощения о-поляризованного излучения можно снизить до уровня, не превышающего  $0.05 \text{ см}^{-1}$  [20–25]. Лучевая стойкость  $ZnGeP_2$  на длине волны излучения лазера накачки ( $\lambda = 2.05$  мкм) при длительности импульсов  $\sim 10$  нс и частоте их следования 10 кГц составляет  $\sim 0.074 \text{ ГВт/см}^2$  [26], а для излучения эрбиевого лазера ( $\lambda = 2.94$  мкм, длительность импульсов 0.11 нс, частота их следования 1 Гц) она равна  $\sim 30 \text{ ГВт/см}^2$  [27]. Монокристалл  $ZnGeP_2$  имеет сравнительно большую нелинейную восприимчивость ( $d = (70-85.4) \times 10^{-12} \text{ пм/В}$ ) и хорошую теплопроводность, что особенно важно для реализации высоких средней и пиковой мощностей излучения.

Целью настоящей работы является определение энергетических и спектральных характеристик ПГ на базе монокристаллов  $ZnGeP_2$  при накачке излучением Но:YAG-

А.И.Грибенюков. Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академгородок, Академический просп., 10/3

С.М.Ватник. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15Б

В.В.Демин, С.Н.Подзывалов, И.Г.Половцев, Н.Н.Юдин. Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; e-mail: gach3@yandex.ru

Поступила в редакцию 19 марта 2018 г.

лазера с оценкой возможности создания на их основе эффективных источников излучения, перестраиваемого в диапазоне длин волн 3–4 мкм, для реализации ТГц излучения в кристалле  $ZnGeP_2$  при накачке на разностной частоте.

Следует отметить, что в качестве источников излучения с  $\lambda = 2.1$  мкм для накачки ПГ на основе монокристалла  $ZnGeP_2$  широко используются импульсно-периодические  $Ho:YAG$ -лазеры с резонансной оптической накачкой излучением волоконных или кристаллических тулиевых лазеров, например  $Tm:YLF$ -лазера. Эффективность преобразования излучения тулиевого лазера в такой системе достигает  $\sim 50\%$ , при этом средняя мощность генерации излучения с  $\lambda = 2.1$  мкм составляет  $\sim 15$  Вт [28–30].

## 2. Экспериментальный стенд для исследования ПГ

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Источником накачки ПГ на основе монокристалла  $ZnGeP_2$  является импульсно-периодический  $Ho:YAG$ -лазер, накачка которого осуществляется излучением  $Tm:YLF$ -лазера ( $\lambda = 1.908$  мкм), сфокусированным линзой Л1 в кристалл  $Ho:YAG$ . Резонатор  $Ho:YAG$ -лазера образован дихроичным зеркалом 31 с коэффициентами отражения  $\sim 99\%$  на длине волны генерации и пропускания  $\sim 99\%$  на длине волны излучения накачки, глухим зеркалом 32, выходным сферическим зеркалом 33 с радиусом кривизны  $\sim 300$  мм и диэлектрическим покрытием с коэффициентом отражения  $\sim 80\%$  на длине волны генерации. Сужение спектра генерации  $Ho:YAG$ -лазера осуществляется интерференционно-поляризационным фильтром ИПФ, помещенным в резонатор между выходным (33) и дихроичным (31) зеркалами, при этом режим активной модуляции добротности осуществляется с помощью акустооптического модулятора АОМ. Оптическая развязка между резонаторами ПГ и  $Ho:YAG$ -лазера осуществляется оптическим изолятором ОИ. В экспериментах использовался  $Ho:YAG$ -лазер со следующими характеристиками: максимальная средняя мощность излучения в импульсном режиме 15 Вт, частота следования импульсов 10 кГц, их длительность по полувысоте 26 нс. Резонатор ПГ образован зеркалом 34 с коэффициентом пропускания  $\sim 99\%$  на длине волны излучения накачки и коэффициентом отражения  $\sim 99\%$  на длине волны генерируемого излучения

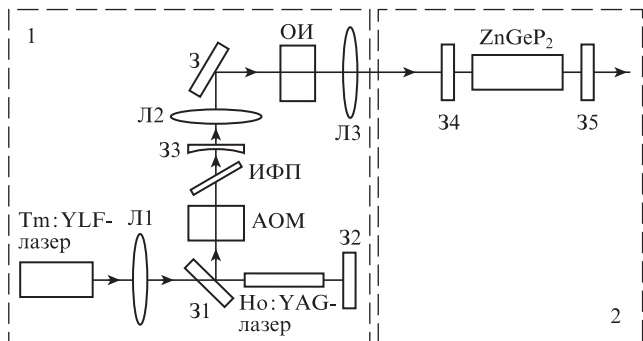


Рис.1. Схема параметрического генератора на базе монокристалла  $ZnGeP_2$  с накачкой излучением  $Ho:YAG$ -лазера. Часть 1 установки: Л1, Л2, Л3 – линзы; 31 – дихроичное зеркало; 32 – глухое зеркало резонатора; 33 – выходное зеркало резонатора; АОМ – акустооптический модулятор; ИПФ – интерференционно-поляризационный фильтр; 3 – глухое зеркало; ОИ – оптический изолятор. Часть 2 установки: 34 – входное зеркало резонатора; 35 – выходное зеркало резонатора.

и зеркалом 35. Это зеркало имеет просветляющее покрытие с коэффициентом пропускания  $\sim 99\%$  на длине волны излучения накачки и светоделительное покрытие с коэффициентом отражения  $50\%$  на длине волны генерации, что позволяет реализовать однопроходную накачку. В резонатор, образованный зеркалами 34 и 35, помещен монокристалл  $ZnGeP_2$  (ООО «ЛОК», Томск) длиной 20 мм с нанесенными на рабочие торцы просветляющими покрытиями для длин волн 2.097 и 3.5–4 мкм.

## 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В ходе экспериментов измерялись средняя мощность  $P_p$  излучения накачки на  $\lambda = 2.097$  мкм, средняя мощность излучения накачки  $P_{2.097}$ , вышедшего из резонатора ПГ (не поглощенного в кристалле  $ZnGeP_2$ ), и суммарная мощность  $P_{sum}$  излучения на выходе из резонатора ПГ, что позволило определить среднюю мощность излучения ПГ ( $P_{PG} = P_{sum} - P_{2.097}$ ) в диапазоне  $\lambda = 3.5$ –4.8 мкм. На основе полученных данных рассчитывался КПД ПГ ( $(P_{PG}/P_p) \times 100\%$ ) в зависимости от средней мощности и плотности энергии  $W$  излучения накачки. Основные экспериментальные результаты представлены на рис.2. Существенный рост  $P_{PG}$  и КПД параметрической генерации наблюдается в случаях, когда средняя мощность и плотность энергии (на торце нелинейного кристалла) излучения накачки превышают 2 Вт и 0.16 Дж/см<sup>2</sup> соответственно. При этом зависимость средней мощности генерируемого монокристаллом излучения от средней мощности излучения накачки указывает на наличие пороговых условий генерации. Дифференци-

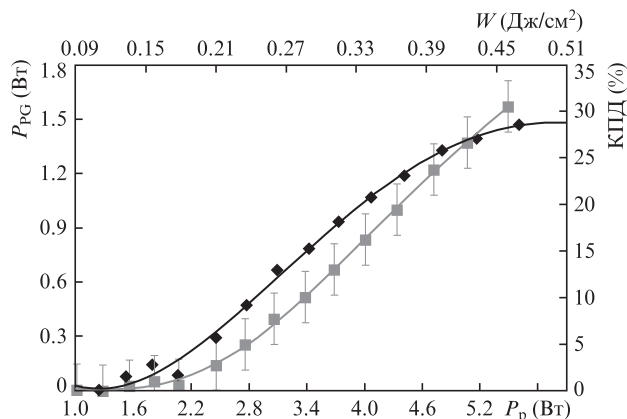


Рис.2. Зависимости мощности излучения (■) и КПД (◆) параметрического генератора от плотности энергии и средней мощности излучения накачки.

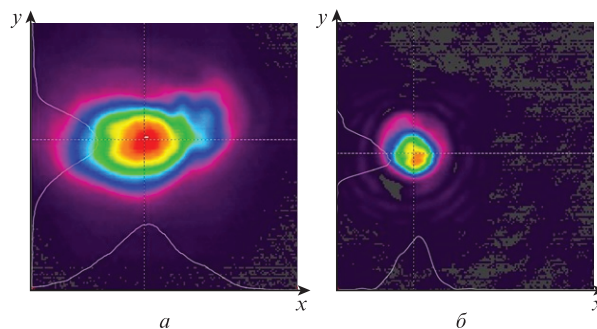


Рис.3. Распределения интенсивности излучения ПГ (a) и интенсивности излучения накачки в отсутствие монокристалла  $ZnGeP_2$  в резонаторе (b) в поперечных сечениях пучков.

альный КПД ПГ составляет  $\sim 3.9\%$  при  $P_p < 2.0$  Вт и  $\sim 49.8\%$  при больших значениях средней мощности накачки. Максимальные достигнутые в эксперименте средние мощности излучения ПГ и КПД составили  $\sim 1.5$  Вт и  $\sim 28.6\%$  при  $P_p \sim 5.5$  Вт и  $W \sim 0.47$  Дж/см<sup>2</sup>. При этом длительность импульса излучения ПГ ( $\sim 26$  нс) соизмерима с длительностью импульса излучения накачки. Эксперименты проводились при диаметре пучка излучения накачки на торце монокристалла ZnGeP<sub>2</sub>, равном 385 мкм (на уровне  $1/e^2$ ).

Измерения распределений интенсивности в поперечных сечениях пучков излучения ПГ и накачки (рис.3), а также расходимостей излучения ПГ и накачки осуществлялись по методике [31] при помощи камеры Picosam III и интерференционного фильтра, который отражал  $\sim 99\%$  излучения накачки и пропускал 40%–60% излучения ПГ. Первоначально проводилось измерение диаметра  $d_1$  пучка излучения ПГ в дальней зоне, затем Picosam III отодвигалась на расстояние  $L$  и измерялся диаметр  $d_2$ . Угол расходимости вычислялся по формуле  $\theta = \arctan(d_2 - d_1)/L$ . Аналогичным образом определялась расходимость излучения накачки.

Угол расходимости излучения накачки составил около 9 мрад. Углы расходимости излучения ПГ составили 20 мрад по оси  $x$  и 16 мрад по оси  $y$ . Параметр  $M_{x,y}^2$  для пучка излучения накачки составил  $\sim 2.6$ , а для пучка излучения ПГ  $M_x^2 \sim 3.5$ ,  $M_y^2 \sim 2.8$ .

Регистрация спектра излучения ПГ проводилась по схеме, представленной на рис.4, при мощности излучения накачки  $\sim 4$  Вт, ширинах входной и выходной щелей монохроматора МДР-204, равных 100 мкм, с использованием дифракционной решетки 300 штр./мм и фотосопротивления ФС-ХМ0009 из PbS в качестве фотоприемника на выходной щели монохроматора. Диапазон спектральной чувствительности фотоприемника составлял 0.8–3.9 мкм, что позволило провести спектральные измерения только для сигнальной волны генерируемого излучения. Остаточное излучение лазера накачки и излучение ПГ, отраженные от алюминиевого сферического зеркала СЗ с фокусным расстоянием 20 см, направлялись на германиевый фильтр  $\Phi_{Ge}$  зеркалом 3. Входная щель монохроматора располагалась в фокальной плоскости алюминиевого сферического зеркала. Фокусировка излучения ПГ на входную щель монохроматора позволила существенно увеличить сигнал, приходящий на фотоприемник, а также пло-

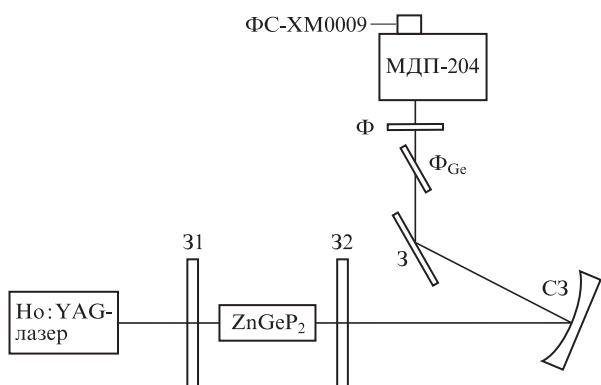


Рис.4. Схема стенда для регистрации спектра излучения ПГ: 31, 32 – зеркала резонатора; СЗ – сферическое зеркало; 3 – алюминиевое зеркало;  $\Phi_{Ge}$  – германиевый фильтр, расположенный под углом Брюстера к направлению распространения излучения;  $\Phi$  – интерференционный фильтр.

щадь заполнения дифракционной решетки, что повысило разрешающую способность монохроматора. Фильтрация излучения ПГ от остаточного излучения накачки ( $\lambda = 2.097$  мкм) осуществлялось за счет расположения  $\Phi_{Ge}$  под углом Брюстера, т. к. поляризации этих излучений взаимно перпендикулярны. В итоге мощность остаточного излучения с  $\lambda = 2.097$  мкм за германиевой пластиной не превышала 200 мВт при средней мощности излучения ПГ около 400 мВт. Дополнительный интерференционный фильтр  $\Phi$  полностью отражал остаточное излучение накачки и пропускал  $\sim 70\%$  излучения ПГ.

На рис.5 представлен спектр генерируемой в ПГ сигнальной волны излучения при угле  $\theta$  между кристаллографической осью  $C$  и направлением распространения излучения накачки, равном  $53.35^\circ$ .

Спектр сигнальной волны представлял собой полосы с ширинами  $\sim 200$  нм, включающие в себя несколько линий шириной 20–30 нм, с центрами полос на  $\lambda = 3.43$  и 3.765 мкм. Такая структура спектра излучения характерна для ПГ с двухзеркальным резонатором [18, 28].

В работе [18] приведена зависимость КПД параметрической генерации от мощности излучения накачки при диаметре пучка излучения накачки  $\sim 900$  мкм (по уровню  $1/e^2$ ), полученной на одном элементе ZnGeP<sub>2</sub> длиной 18 мм и на тандеме из таких элементов длиной 18 мм каждый в схеме с компенсацией сноса излучения, что позволяет получить зависимость КПД от плотности энергии излучения накачки. В [28] приведена зависимость мощности излучения ПГ от мощности излучения накачки при диаметре его пучка  $\sim 400$  мкм (по уровню  $1/e^2$ ). ПГ состоял из двух элементов ZnGeP<sub>2</sub> длиной 14 мм каждый, также расположенных по схеме с компенсацией сноса излучения, что позволяет получить зависимость КПД генерации от плотности энергии излучения накачки. Из представленной на рис.2 зависимости КПД от плотности энергии излучения накачки и результатов работ [18, 28] видно, что дальнейшее увеличение плотности энергии накачки (свыше  $\sim 0.4$  Дж/см<sup>2</sup>) не приводит к росту эффективности генерации, а выходная мощность растет только за счет уменьшения порога параметрической генерации. Соответственно, среднюю мощность и энергию импульса генерации можно увеличивать путем увеличения мощности накачки, сохраняя плотность энергии накачки на уровне  $\sim 0.4$  Дж/см<sup>2</sup> при соответствующем увеличении диаметра пучка излучения накачки, что может привести к уменьшению расходимости пучка излучения, но ухудшить его модовый сос-

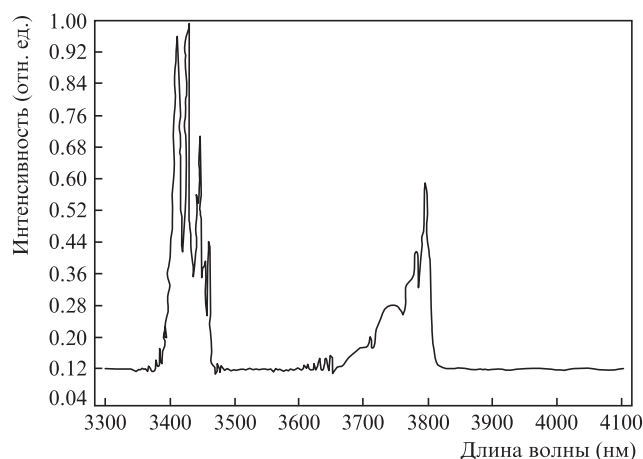


Рис.5. Спектр излучения ПГ, измеренный с шагом  $\Delta\lambda = 1$  нм.



тав. Данный подход позволяет использовать для реализации параметрической генерации более дешевый материал с меньшей лучевой стойкостью, обеспечивая предельные эффективность и выходные энергетические характеристики, но ухудшая качество генерируемого пучка. Среднюю мощность излучения ПГ можно увеличить при превышении плотностью энергии излучения накачки  $0.4 \text{ Дж/см}^2$ . При этом качество генерируемого пучка не ухудшится, а выходная мощность будет расти за счет уменьшения порога параметрической генерации.

В современных исследованиях довольно часто используются оптоволоконные каналы. Астигматизм пучка существенно влияет на эффективность ввода излучения в многомодовые оптоволоконные каналы, тогда как коэффициент распространения пучков  $M^2$  не оказывает существенного влияния на этот параметр. Значение  $M^2$ , полученное в настоящей работе, оказалось достаточным для эффективного ввода излучения в оптоволоконно. Пучок генерируемого излучения, как видно из рис.3, обладает значительным астигматизмом, что может быть связано с погрешностями обработки рабочих поверхностей элемента (клиновидность и астигматизм поверхности), влияние которых усиливается из-за большого показателя преломления кристалла  $\text{ZnGeP}_2$  ( $\sim 3$ ). В связи с этим качество обработки поверхности монокристалла должно быть таким, чтобы обеспечивалась высокая эффективность ввода излучения в монокристалл. Кроме того, в результате использования двухзеркального резонатора возможно возникновение астигматизма [13]. Одним из решений данной проблемы может быть использование кольцевого резонатора [13].

#### 4. Заключение

Экспериментально реализована параметрическая генерация со средней мощностью 1.5 Вт в спектральной области 3.5–4.8 мкм при частоте следования импульсов накачки 10 кГц. Длительность импульса генерации составила  $\sim 26 \text{ нс}$ , энергия импульса – 0.15 мДж. Проведенные исследования показали, что при плотности мощности излучения накачки  $\sim 0.4 \text{ Дж/см}^2$  возможно достижение высокого КПД преобразования излучения накачки в излучение генерации, что позволит получить эффективную параметрическую генерацию при плотности энергии излучения накачки, меньшей порога разрушения  $\text{ZnGeP}_2$ , при накачке монокристалла излучением импульсно-периодического Но: YAG-лазера. Спектральные измерения показали, что в ПГ на базе монокристалла  $\text{ZnGeP}_2$  можно реализовать перестройку излучения, используя интерференционные фильтры совместно с фильтрами Лио [32]. Это позволяет создавать на базе монокристаллов  $\text{ZnGeP}_2$  перестраиваемые двухчастотные источники накачки для генерации ТГц излучения (при накачке на разностной частоте) с перестройкой его частоты в диапазоне 0.1–2 ТГц.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект №8.2712.2017/4.6).

1. Сысоев В.К., Солдатов А.Н., Вятлев П.А., Захарченко А.В., Васильева А.В. *Физика и химия обработки материалов*, 3, 12 (2007).

2. Парфенов В.А. *Лазерная микрообработка материалов* (СПб.: изд-е СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011).
3. Романовский О.А. *Прикладная физика*, 1, 24 (2009).
4. Бочковский Д.А., Васильева А.В., Матвиенко Г.Г., Полунин Ю.П., Романовский О.А., Солдатов А.Н., Харченко О.В., Юдин Н.А., Яковлев С.В. *Оптика атмосферы и океана*, 24 (11), 985 (2011).
5. Шигапов А.Б., Ярхамов Ш.Д. *Изв. вузов. Сер. Авиационная техника*, №4, 58 (2004).
6. Дьяченко В.В., Половченко С.В., Роговский В.В., Чартий П.В. *Научный диалог*, №7, 6 (2012).
7. Солдатов А.Н., Полунин Ю.П., Шумейко А.С., Васильева А.В., Лоева Я.А. *Изв. вузов. Сер. Физика*, 10 (2), 39 (2013).
8. Солдатов А.Н., Полунин Ю.П., Васильева А.В., Костыря И.Д., Куксаузен Д.А. *Биотехносфера*, 3-4 (21-22), 47 (2012).
9. Edwards G.S., Austin R.H., Carroll F.E., Copeland M.L., Couprie M.E., Gabella W.E., Haglund R.F., Hooper B.A., Hutson M.S., Jansen E.D., Joos K.M., Kiehart D.P., Lindau I., Miao J., Pratisto H.S., Shen J.H., Tokutake Y.A., van der Meer F.G., Xie A. *Rev. Sci. Instrum.*, 74 (7), 3207 (2003).
10. Hutson M.S., Edwards G.S. *Proc. 26th Intern. Free Electron Laser Conf. and 11th FEL User Workshop* (2004, p. 648).
11. Joos K.M., Shen J.H., Shetlar D.J., Casagrande V.A. *Lasers Surg. Med.*, 27 (3), 191 (2000).
12. Mackanos M.A., Simanovskii D., Joos K.M., Schwettman H.A., Jansen E.D. *Lasers Surg. Med.*, 39 (3), 230 (2007).
13. Stoeppler G., Thilmann N., Pasiskevicius V., Zukauskas A., Canalias C., Eichhorn M. *Opt. Soc. Am.*, 20 (4), 4509 (2012).
14. Telfair W.B., Bekker C., Hoffman H.J., Yoder P.R., Nordquist R.E., Eiferman R.A., Zenzie H.H. *J. Refract. Surg.*, 16 (1), 40 (2000).
15. Грибенюков А.И., Демин В.В., Половцев И.Г., Юдин Н.Н. *Изв. вузов. Сер. Физика*, 60 (11), 116 (2017).
16. Gribenyukov A.I., Dyomin V.V., Polovtsev I.G., Kutuzov I.Y., Yudin N.N. *Proc. SPIE*, 10466, 1046628-1 (2017).
17. Yan D., Wang Y., Xu D., Liu P., Yan C., Shi J., Liu H., He Y., Tang L., Feng J., Guo J., Shi W., Zhong K., Tsang Y.H., Yao J. *Photon. Research*, 5 (2), 82 (2017).
18. Антипов О.Л., Еранов И.Д., Косицын Р.И. *Квантовая электроника*, 47 (7), 601 (2017) [*Quantum Electron.*, 47 (7), 601 (2017)].
19. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* (Berlin: Springer Ser. Opt. Sci., Vol. 64, 1999, p. 407).
20. Schunemann P.G., Schepler K.L., Budni P.A. *MRS Bulletin*, 23, 45 (1998).
21. Верозубова Г.А., Окунев А.О., Стащенко В.А. *Вестник Новгородского государственного университета. Физика*, 3 (86), 40 (2015).
22. Gribenyukov A.I. *Oceanic Opt.*, 15, 61 (2002).
23. Schunemann P.G., Schepler K.L., Budni P.A. *MRS Bulletin*, 23, 45 (1998).
24. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Гейко П.П., Грибенюков А.И., Зуев В.В., Солодухин А.С., Трушин С.А., Чураков В.В., Шубин С.Ф. *Квантовая электроника*, 14, 2137 (1987) [*Quantum Electron.*, 17, 1362 (1987)].
25. Chou H.P., Slater R.C., Wang Y. *Appl. Phys.*, 66, 555 (1998).
26. Budni P.A., Pomeranz L.A., Lemons M.L., Schunemann P.G., Pollak T.M., Chicklis E.P. *OSA Trends Opt. Photon. Ser.*, 19, 226 (1998).
27. Водопьянов К.Л., Воеводин В.Г., Грибенюков А.И., Кулевский Л.А. *Квантовая электроника*, 14 (9), 1815 (1987) [*Quantum Electron.*, 17 (9), 1159 (1987)].
28. Lippert E., Nicolas S., Arisholm G., Stenersen K., Rustad G. *Appl. Opt.*, 45 (16), 3839 (2006).
29. Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Шарков В.В., Савикин А.П. *Квантовая электроника*, 40 (2), 98 (2010) [*Quantum Electron.*, 40 (2), 98 (2010)].
30. ZhouRen-Lai, JuYou-Lun, WangWei, ZhuGuo-Li, WangYue-Zhu *Chin. Phys. Lett.*, 28 (7), 074210 (2011).
31. Демин В.В., Половцев И.Г., Симонова Г.В. *Оптические измерения* (Томск: Издательский дом ТГУ, 2014).
32. Сироткин А.А., Гарнов С.В., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, 42 (5), 420 (2012) [*Quantum Electron.*, 42 (5), 420 (2012)].