

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535-5

**Параметрический генератор света среднего ИК-диапазона
на основе периодически-поляризованного ниобата лития
с накачкой лазером на керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$**

**Д.Б. Колкер^{1,2}, О.Л. Антипов³, С.В. Ларин⁴, Л.И. Исаенко^{2,6},
В.Н. Веденяпин^{2,6}, А.Р. Ахматханов⁵, В.Я. Шур^{5*}**

¹Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15б

²Новосибирский государственный университет

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

³Институт прикладной физики РАН

603155, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 4б

⁴ИРЕ-Полюс

141190, Московская обл., Фрязино, пл Введенского, 1, стр. 3

⁵Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет

620026, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 48

⁶Институт Геологии и Минералогии СО РАН им В.С. Соболева

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3

Поступила в редакцию 31.05.2019 г.

В работе представлены результаты экспериментов по параметрической генерации света в кристаллах легированного магнием ниобата лития $LiNbO_3$ (LN) с регулярной доменной структурой PPMgO:LN с накачкой лазером на керамике $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ с длиной волны 1,9 мкм, который, в свою очередь, накачивался излучением волоконного лазера с рамановским преобразованием. Средняя мощность на выходе PPMgO:LN в спектральном диапазоне 3,7–4,2 мкм составила 530 мВт при мощности накачки в 7,9 Вт; при этом полная эффективность преобразования в параметрическом генераторе света составила 6,7%, а дифференциальная эффективность – 8%.

Ключевые слова: параметрический генератор света, периодически поляризованная структура, средний ИК-диапазон, $Tm:Lu_2O_3$ -лазер; optical parametric oscillator, periodically-poled structure, mid-infrared, PPMgO:LN.

Введение

Излучение в среднем ИК-диапазоне (3–14 мкм) эффективно применяется в обработке материалов, хирургии и медицинской диагностике, контроле производственных процессов и т.д. В этом спектральном диапазоне находятся фундаментальные полосы поглощения различных газов, что позволяет проводить дистанционный или локальный анализ атмосферы с помощью лазеров, длина волны излучения которых попадает в эти полосы поглощения. Однако фоновое поглощение парами воды и рядом атмосферных газов (CO_2 , NH_3 и др.) значительно

ограничивает спектральные области, в которых можно производить дистанционное лазерное зондирование. Окна прозрачности атмосферы, часто используемые для прохождения лазерного излучения, расположены в диапазонах 3,5–4,1; 4,3–5,0 и 8–12 мкм.

Анализ источников излучения среднего ИК-диапазона спектра показал, что наиболее перспективный вариант излучателя в спектральном диапазоне 3–5 мкм – параметрический генератор света (ПГС) на основе нелинейно-оптических кристаллов с накачкой твердотельными лазерами. К настоящему времени достигнут рекордный уровень средней мощности излучения в диапазоне 3–5 мкм: ~100 Вт при использовании ПГС на основе нелинейных кристаллов ZGP с накачкой излучением лазера на кристалле $Ho^{3+}:YAG$ на длине волны $\lambda \approx 2,1$ мкм [1, 2]. Этот результат удалось получить благодаря совокупности базовых параметров кристалла ZGP: высоких значений нелинейности, двулучепреломления и теплопроводности, а также высокого качества кристалла и обработки поверхностей. Кристалл ZGP

* Дмитрий Борисович Колкер (dkolker@mail.ru); Олег Леонидович Антипов (oleg_antipov@yahoo.com); Сергей Владимирович Ларин (slarin@ntoire-polus.ru); Людмила Ивановна Исаенко (lyudmila.isaenko@mail.ru); Виталий Николаевич Веденяпин (blackraven@ngs.ru); Андрей Ришатович Ахматханов (andrey.akhmathanov@urfu.ru); Владимир Яковлевич Шур (vladimir.shur@urfu.ru).

прозрачен в спектральном диапазоне 0,74–12 мкм. Ограничения его использования для мощных лазерных систем обусловлены невысоким порогом оптического повреждения, не превышающим 1–2 Дж/см² и заметно снижающимся в течение нескольких секунд при импульсно-периодической накачке [2, 3].

В спектральной области 2,5–4,5 мкм эффективными нелинейными средами для ПГС также являются сегнетоэлектрические нелинейно-оптические кристаллы с регулярной доменной структурой: легированные магнием кристаллы ниобата лития PPMgO:LN, а также кристаллы KTiOPO₄ и KTiOAsO₄.

На рис. 1 приведены спектры пропускания КТР, КТА и MgO:LN. Следует отметить, что уменьшение пропускания наблюдается в КТР в спектральном диапазоне 3–3,5 мкм, а в КТА – для $\lambda > 5$ мкм. Важная особенность КТА и КТР – рекордно высокий порог оптического повреждения (до 1 ГВт/см²), позволяющий использовать эти кристаллы для изготовления силовой оптики [4–6].

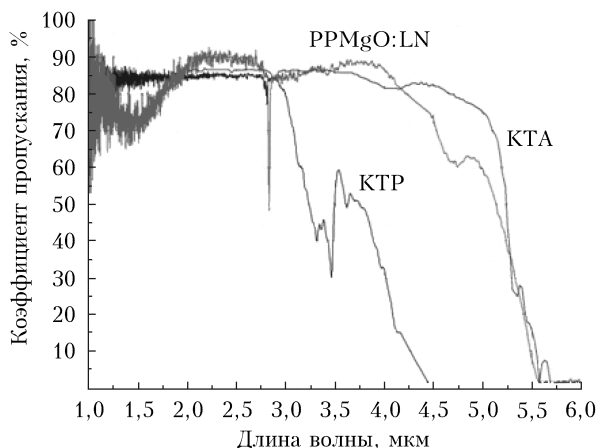


Рис. 1. Спектры пропускания в среднем ИК-диапазоне кристаллов КТР, КТА и MgO:LiNbO₃

Преимущество структур PPMgO:LN и кристаллов КТР/КТА – возможность их накачки излучением твердотельных лазеров на длине волны ~1 мкм, технология изготовления которых хорошо разработана. Еще в 1996 г. была продемонстрирована генерация перестраиваемого непрерывного излучения в спектральном диапазоне 3,3–3,9 мкм с мощностью более 1 Вт в ПГС на базе PPMgO:LN с накачкой излучением Nd³⁺:YAG-лазером на длине волны 1,064 мкм [7].

В 2005 г. было описано изготовление структуры PPMgO:LN размером 5 × 5 мм² с периодом 32,1 мкм для генерации излучения в среднем ИК-диапазоне [8]. Параметрическое преобразование с использованием этих кристаллов с эффективной длиной 36 мм без просветляющего покрытия обеспечивало на выходе энергию импульсов излучения до 77 мДж в сумме для сигнальной (1,83 мкм) и холостой (2,54 мкм) волн с общей эффективностью 72% при накачке излучением Nd³⁺:YAG-лазера с модуляцией добротности

(энергия импульсов накачки 110 мДж, длительность 12 нс).

В 2011–2012 гг. были созданы мощные ПГС среднего ИК-диапазона на основе структур PPMgO:LN [9–13]. Например, стабильный непрерывный однорезонаторный ПГС с накачкой непрерывным иттербиевым волоконным лазером. Общая выходная мощность генерации – 17,5 Вт при эффективности преобразования накачки ~61% [12]. При той же накачке структур PPMgO:LN излучением иттербиевого волоконного лазера по схеме «задающий генератор – усилитель» средняя выходная мощность составила ~21 Вт при дифференциальной эффективности преобразования ~45%.

Определенным недостатком накачки ПГС на $\lambda \approx 1$ мкм является тот факт, что в диапазон длин волн более 3 мкм попадает только холостая волна, а сигнальная волна остается в диапазоне 1,5–2 мкм.

Ранее было предпринято несколько попыток получить мощную параметрическую генерацию в области 3–5 мкм при накачке структур PPMgO:LN излучением импульсных лазеров двухмикронного диапазона (с большой энергией импульсов, но с низкой частотой их повторения): Tm:YAG-лазера на $\lambda = 2,0124$ мкм [14], Tm, Ho:YLF-лазера на $\lambda = 2,051$ мкм [15], а также Tm, Ho:GdVO₄-лазера на $\lambda = 2,048$ мкм [16]. Однако заметное поглощение структур PPMgO:LN на $\lambda > 4$ мкм, существенно влияющее на холостую волну, ограничивало импульсную энергию и среднюю мощность параметрической генерации [14–16]. Лазерное излучение на длине волны в области 2 мкм также использовалось для накачки структур PPMgO:LN в экспериментах по генерации второй гармоники – обратного нелинейно-оптического преобразования в диапазон длин волн ~1 мкм [17–20].

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по параметрической генерации в среднем ИК-диапазоне в структуре PPMgO:LN с накачкой лазером на основе керамики Tm³⁺:Lu₂O₃ на $\lambda \approx 1,966$ мкм. Использование такой длины волны накачки позволило получить генерацию сигнальной и холостой волн в окне прозрачности атмосферы 3,5–4,1 мкм. В отличие от [14–16] с накачкой на $\lambda = 2$ мкм, в наших экспериментах накачка осуществлялась на меньшей длине волны, что позволило снизить негативное влияние поглощения холостой волны, а также с меньшей энергией в импульсах (0,1–1,2 мДж) при большой частоте повторения 8–23 кГц, что позволило увеличить порог оптического пробоя по средней интенсивности пучков накачки и генерации.

Структура PPMgO:LN

В наших экспериментах была использована структура PPMgO:LN (компания «Лабфер», г. Екатеринбург) с несколькими периодами в монокристаллической пластине конгруэнтного ниобата лития (LiNbO₃, LN), легированного 5 мол.% MgO

(Yamaji Ceramics, Япония). Использовались пластины MgO:LN диаметром 7,53 см и толщиной 3 мм. На полярные поверхности пластин был нанесен слой Ta толщиной 80 нм методом магнетронного распыления в Ar-плазме. Система периодических полосовых электродов была создана на Z+ полярной поверхности реактивно-ионным травлением слоя Ta через созданную методами фотолитографии маску фоторезиста (негативный фоторезист AZ® nLOF 2020 компании Microchemicals, Германия). Регулярные доменные структуры (РДС) были изготовлены приложением электрического поля через систему периодических полосовых электродов (температура пластины 423–473 К) при помощи многоимпульсной методики (multipulse poling) [21]. Геометрические размеры области с РДС в конфигурации multigrating составили $20 \times 3 \times 10$ мм. На одной подложке были изготовлены три «дорожки» с периодами 28,4, 28,8 и 29,7 мкм (рис. 2).

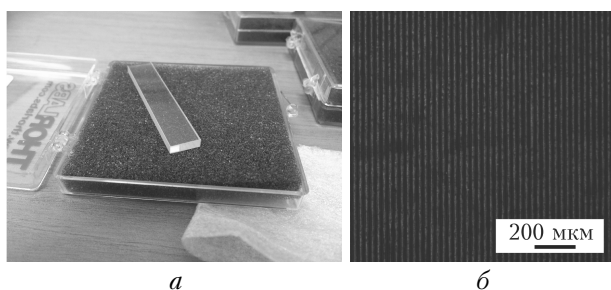


Рис. 2. Структуры PPMgO:LN: а – подложка; б – микроскопическое изображение доменной структуры

На входную и выходную грани кристалла было нанесено стандартное однослойное покрытие, оптимизированное на пропускание на $\lambda = 1,5$ мкм (ИЛФ СО РАН).

Картирование структуры PPMgO:LN

Перед началом экспериментов было проведено картирование структуры PPMgO:LN [22]. Исследовалось распределение интенсивности холостой волны излучения ПГС по апертуре PPMgO:LN (рис. 3, цв. вставка) при накачке излучением Nd³⁺:YAG-лазера с длиной волны 1,064 мкм (LQ215, SolarLaserSystem, Беларусь). Кристалл PPMgO:LN устанавливался в резонатор ПГС, и распределение энергии/мощности излучения холостой волны измерялось сканированием структуры в плоскости Y–Z (перпендикулярной оси резонатора) с шагом 0,2 мм при помощи двух однокоординатных линейных моторизованных платформ (Standa, Литва), управляемых компьютером. Излучение накачки фокусировалось в кристалл PPMgO:LN вспомогательной линзой с фокусным расстоянием $f = 100$ мм для получения диаметра пучка накачки $\sim 0,5$ мм. На карту распределения интенсивности холостой волны ПГС было нанесено ~ 1000 точек.

При сканировании апертуры PPMgO:LN было отчетливо видно отклик от трех дорожек РДС (см. рис. 3), причем на крайней правой дорожке отмечалась наибольшая энергия холостой волны. Границы дорожек просматривались четко как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Энергия холостой волны была максимальной в центральной части каждой дорожки и минимальной на границе стенок регулярной доменной структуры. Таким образом, можно сделать заключение о размерах так называемой мертвой зоны структуры, ограничивающей рабочую апертуру. Эффективная апертура кристалла, по нашим оценкам, составила $20,5 \text{ мм}^2$, $\sim 68\%$ от полной апертуры.

Экспериментальная установка

В последующих экспериментах в качестве источника накачки для ПГС на основе PPMgO:LN был использован лазер на керамике Tm³⁺:Lu₂O₃ с длиной волны 1,966 мкм, изготовленный в Институте прикладной физики РАН [23]. Этот лазер накачивался излучением непрерывного эрбиевого волоконного лазера с рамановским преобразованием длины волны на 1,670 мкм (ELM-1670-50, НТО ИРЭ-Полюс, Фрязино, Московская обл.). Длина волны лазера могла «переключаться» с 2,076 мкм при низких мощностях накачки (<2 Вт) на 1,966 мкм при высоких значениях накачки (>5 Вт). Лазер работал в режиме модуляции добротности и имел линейную поляризацию при средней мощности 12 Вт и частоте следования импульсов 13–14 кГц. Длительность импульса составляла 35–40 нс при средней мощности 8–10 Вт, частоте следования 8–23 кГц и увеличивалась до 100–300 нс при уменьшении средней мощности. Внутррезонаторный кварцевый эталон, установленный под углом, близким к углу Брюстера, служил для уменьшения ширины линии генерации лазера и стабилизации поляризации пучка накачки. При выходной мощности до 10 Вт лазер генерировал одномодовый гауссов пучок излучения высокого качества (с параметром качества $M^2 \leq 1,2$).

Пучок лазера фокусировался в PPMgO:LN линзами с $f = 70$ или 100 мм. С учетом геометрической расходимости излучения на выходе лазера эффективное фокусное расстояние составляло 100 или 140 мм, а диаметр пучка в фокусе – 180–250 мкм (по уровню e^{-2} по интенсивности). Для оптимизации средней мощности ПГС положение линзы могло изменяться относительно кристалла вдоль оси X (рис. 4).

Кристалл PPMgO:LN был размещен в термостабилизированном радиаторе, изготовленном в Институте лазерной физики СО РАН, с возможностью изменения температуры от 293 до 433 К. Температура PPMgO:LN поддерживалась с точностью до 0,1 К при помощи контроллера Thorlabs TC-200. Резонатор ПГС (в двухрезонаторной конфигурации для сигнальной и холостой волн) был сформирован двумя плоскими зеркалами: входным

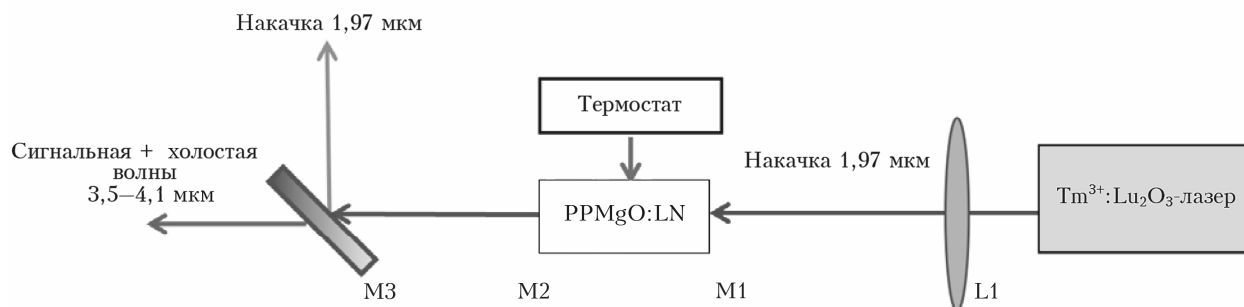


Рис. 4. Экспериментальная установка ПГС на основе PPMgO:LN (3,7–4,2 мкм): M1–M3 – зеркала; L1 – линза для фокусировки накачки; Tm³⁺:Lu₂O₃ – лазер накачки

зеркалом с высоким пропусканием в области 2 мкм и высоким отражением в спектральном диапазоне 3,7–4,7 мкм и выходным зеркалом с ~50% отражением в этом диапазоне (зеркала M1 и M2 на рис. 4). Длина резонатора (24 мм) была экспериментально оптимизирована для данной конфигурации ПГС.

Для эффективного параметрического преобразования в кристалле PPMgO:LN был выбран период РДС $\lambda = 29,7$ мкм. Позиция фокусирующей линзы относительно нелинейного элемента с эффективным фокусным расстоянием 140 мм была выбрана таким образом, чтобы достичь диаметра пучка накачки ~250 мкм в фокусе. Экспериментально была показана зависимость выходной средней мощности параметрического генератора света от температуры PPMgO:LN (рис. 5, а). Температура фазового квазисинхронизма для данного периода РДС составила ~420 К, что соответствует режиму ПГС, близкому к вырожденному.

Средняя суммарная мощность ПГС на сигнальной и холостой волне достигала 530 мВт при частоте следования импульсов накачки 15 кГц (рис. 5, б). Широкополосный сигнал генерации

ПГС в области ~3,7–4,2 мкм был зарегистрирован с помощью монохроматора МДР-41 (ОКБ Спектр, Санкт-Петербург) и фотодетектора на основе инфракрасного фото диода PD 36-02-PR(TO18) (IBSG LLC, Санкт-Петербург) (рис. 5, в). При частоте следования импульсов накачки более 15 кГц средняя мощность ПГС снижалась, а при более низких частотах рост мощности параметрической генерации ограничивался пробоем кристалла PPMgO:LN.

Паразитное излучение в красной и голубой области наблюдалось одновременно с генерацией излучения в среднем ИК-диапазоне. «Красное» излучение в области 0,655 мкм может быть идентифицировано как генерация суммарной частоты в PPMgO:LN между излучением накачки в области 1,966 мкм и второй гармоники в области 0,983 мкм, «голубое» излучение в области 0,4915 мкм – как генерация четвертой гармоники накачки [24].

Заключение

Накачка кристалла PPMgO:LN излучением импульсно-периодического лазера на керамике Tm³⁺:Lu₂O₃ на $\lambda = 1,966$ мкм позволяет получить

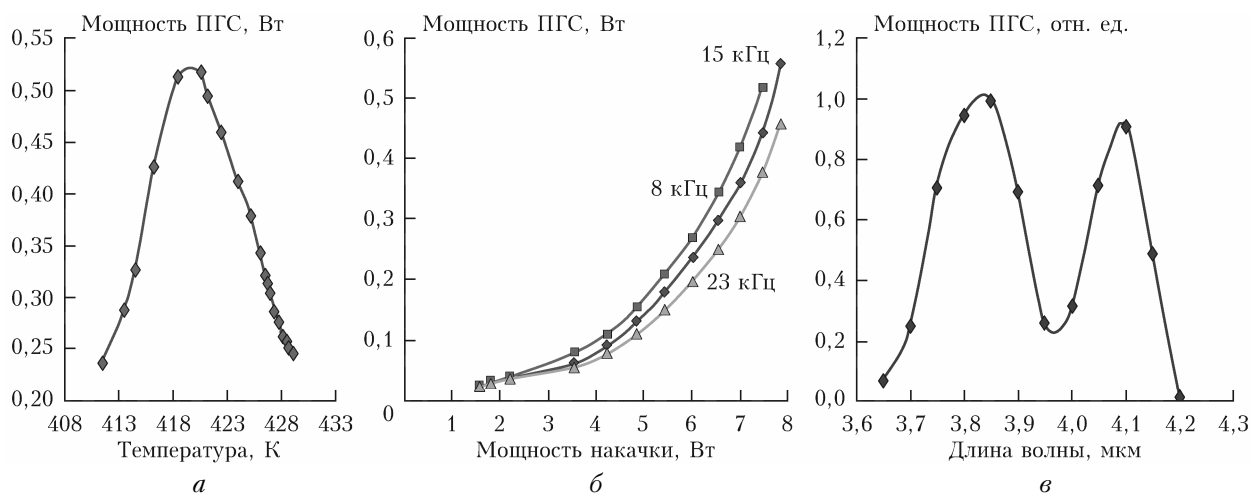


Рис. 5. Выходные характеристики ПГС на PPMgO:LN (мощность сигнальной + холостой волн): выходная мощность в зависимости от температуры нелинейного элемента при средней мощности накачки 7,8 Вт (а) и от входной мощности накачки (при температуре 421 К) (б); спектр излучения ПГС (при температуре 421 К и средней мощности накачки 7,8 Вт) (в)

генерацию на длинах волн среднего ИК-диапазона. Средняя мощность в спектральном диапазоне 3,7–4,2 мкм на выходе ПГС достигает 530 мВт при мощности накачки 7,9 Вт, при этом эффективность преобразования – 6,7%, квантовая эффективность – 12,64–16,06%, а дифференциальная эффективность – 8%. В дальнейшем увеличить мощность ПГС можно за счет повышения мощности накачки и оптимизации резонатора. Определенные ограничения мощности ПГС в среднем ИК-диапазоне связаны с пробоем в объеме нелинейно-оптических элементов PPMgO:LN, а также с обратным преобразованием накачки (генерацией гармоник и суммарных частот) в ближний ИК-диапазон.

Для параметрического преобразования двухмикронного излучения лазеров (например, на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ или кристаллах $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$) в средний ИК-диапазон перспективными представляются также кристаллы КТР и КТА с регулярными доменными структурами. Параметрическая генерация в регулярных доменных структурах на основе, например, кристаллов КТА возможна в диапазоне 2–4,9 мкм, поскольку длинноволновая область поглощения в этих кристаллах ограничена ~5,0 мкм, а порог пробоя по пиковой мощности достигает 1 ГВт/см². Согласно данным программы SNLO [25] условия фазового синхронизма в таких структурах могут быть реализованы как для накачки с длиной волны ~1 мкм, так и для накачки лазерами двухмикронного диапазона на основе керамики $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ (1,96 мкм) и кристаллов $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ -лазеров (2,1 мкм) [26].

Периодическая структура из ниобата лития была изготовлена при финансовой поддержке РФФИ (№ МК 18-29-20077). Эксперименты по картированию периодической структуры из ниобата лития, а также все эксперименты по параметрической генерации с накачкой лазером на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ в области 1,966 мкм были выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-12-00085). Лазер на керамике $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ был модернизирован при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 5 «Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов».

1. Hemming A., Richards J., Davidson A., Carmody N., Bennetts S., Simakov N., Haub J. 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle // Opt. Express. 2013. V. 21, N 8. P. 10062–10069.
2. Zhao Ben-Rui, Yao Bao-Quan, Qian Chuan-Peng, Liu Gao-You, Chen Yi, Wang Rui-Xue, Dai Tong-Yu, Dua Xiao-Ming. 231 W dual-end-pumped Ho:YAG MOPA system and its application to a mid-infrared ZGP OPO // Opt. Lett. 2018. V. 43, N 24. P. 5989–5992.
3. Zawilski K.T., Setzler S.D., Schunemann P.G., Polak T.M. Increasing the laser-induced damage threshold of single crystal ZnGeP_2 // J. Opt. Soc. Am. 2006. V. 23. P. 2310–2316.
4. Bosenberg W.R., Drobshoff A., Alexander J.I., Myers L.E., Byer R.L. 93% pump depletion, 3.5-W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator // Opt. Lett. 1996. V. 21, N 17. P. 1336–1338.
5. Ramana C.V., Atuchin V.V., Becker U., Ewing R.C., Isaenko L.I., Khyzhun O.Yu., Merkulov A., Pokrovsky L.D., Sinelnichenko A.K., Zhurkov S.A. Low-energy Ar^+ ion-beam-induced amorphization and chemical modification of potassium titanyl arsenate (001) crystal surfaces // J. Phys. Chem. C. 2007. V. 111. P. 2702–2708.

6. Khyzhun O.Yu., Bekenev V.L., Atuchin V.V., Sinelnichenko A.K., Isaenko L.I. Electronic structure of KTiOAsO_4 : A comparative study by the full potential linearized augmented plane wave method, X-ray emission spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy // J. All. Comp. 2009. V. 477. P. 768–775.
7. Atuchin V.V., Isaenko L.I., Khyzhun O.Yu., Pokrovsky L.D., Sinelnichenko A.K., Zhurkov S.A. Structural and electronic properties of the KTiOAsO_4 (001) surface // Opt. Mat. 2008. V. 30. P. 1149–1152.
8. Ishizuki H., Taira T. High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a periodically poled $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ device with a 5 mm × 5 mm aperture // Opt. Lett. 2005. V. 30, N 21. P. 2918–2920.
9. Shen Y., Alam S., Chen K.K., Lin D., Cai S., Wu B., Jiang P., Malinowski A., Richardson D.J. PPMgLN-based high-power optical parametric oscillator pumped by Yb^{3+} -doped fiber amplifier incorporates active pulse shaping // IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron. 2009. V. 15, N 2. P. 385–393.
10. Adler F., Cossel K.C., Thorpe M.J., Hartl I., Fermann M.E., Ye J. Phase-stabilized, 1.5 W frequency comb at 2.8–4.8 μm // Opt. Lett. 2009. V. 34, N 9. P. 1330–1332.
11. Wu B., Kong J., Shen Y. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2 W at 3.82 μm // Opt. Lett. 2010. V. 35, N 8. P. 1118–1120.
12. Chaitanya Kumar S., Das R., Samanta G.K., Ebrahim-Zadeh M. Optimally-output-coupled, 17.5 W, fiber-laser-pumped continuous-wave optical parametric oscillator // Appl. Phys. B. 2011. V. 102, N 1. P. 31–35.
13. Lin D., Alam S., Shen Y., Chen T., Wu B., Richardson D.J. Large aperture PPMgLN based high-power optical parametric oscillator at 3.8 μm pumped by a nano-second linearly polarized fiber MOPA // Opt. Express. 2012. V. 20, N 14. P. 15008–15014.
14. Hansson G., Smith D.D. Mid-infrared-wavelength generation in 2-μm pumped periodically poled lithium niobate // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 5743–5746.
15. Hansson G., Smith D.D. Mid-infrared-wavelength generation in 2-nm pumped periodically poled lithium niobate // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 1783–1786.
16. Bao Z.X., Yao B.Q., Ju Y.L., Wong Y.Z. A 2.048 μm Tm,Ho:GdVO₄ Laser Pumped Doubly Resonant Optical Parametric Oscillator Based on Periodically Poled Lithium LiNbO₃ // Chinese Phys. Lett. 2007. V. 24. P. 1953–1954.
17. Frith G., McComb T., Samson B., Torruellas T., Dennis M., Carter A., Khitrov V., Tankala K. Frequency Doubling of Tm-doped Fiber Lasers for Efficient 950 nm Generation // Adv. Sol.-State Photon. 2009. Paper WB5.
18. Honea E., Savage-Leuchs M., Bowers M.S., Yimaz T., Mead R. Pulsed blue laser source based on frequency quadrupling of a thulium fiber laser // Proc. SPIE. 2013. V. 8601. P. 860111–1–6.
19. Creeden D., Blanchard J., Pretorius H., Limongelli J., Setzler S. 486 nm blue laser operating at 500 kHz pulse repetition frequency // Proc. SPIE. 2016. V. 9728. P. 972829-1–7.
20. Xu L., Liang S., Fu Q., Shepherd D.P., Richardson D.J., Alam S. Highly efficient frequency doubling and quadrupling of a short-pulsed thulium fiber laser // Appl. Phys. B. 2018. V. 124. P. 59.

21. *Shur V.Ya, Akhmatkhanov A.R., Baturin I.S.* Micro and nano-domain engineering in lithium niobate // *Appl. Phys. Rev.* 2015. V. 2. P. 40604–40610.
22. *Kolker D., Pronyushkina A., Boyko A., Kostyukova N., Trashkeev S., Nuyshkov B., Shur V.* Experimental investigations of 3 mm aperture PPLN structure // *J. Phys.: Conf. Ser.* 793 012014.
23. *Antipov O., Novikov A., Larin S., Obronov I.* Highly efficient 2 μm CW and Q-switched $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ ceramics lasers in-band pumped by a Raman-shifted erbium fiber laser at 1670 nm // *Opt. Lett.* 2016. V. 41. P. 2298–2301.
24. *Antipov O., Kolker D., Kal'yanov D., Larin S., Shur V., Akhmatkhanov A.* Near-IR second harmonic generation vs mid-IR optical parametric oscillation in multigrating and fan-out PPMgO:LN structures pumped by repetitively-pulsed 2- μm $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ -ceramics laser // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2018. V. 35, N 7. P. 1674.
25. URL: <http://www.as-photonics.com/snlo> (last access: 30.04.2019).
26. *Antipov O.L., Kositsyn R.I., Eranov I.D.* 36 W Q-switched $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ laser at 2097 nm pumped by a Tm fiber laser: evaluation of different Ho^{3+} doping concentrations // *Las. Phys. Lett.* 2017. V. 14, N 1. P. 015002.

D.B. Kolker, O.L. Antipov, S.V. Larin, L.I. Isaenko, V.N. Vedenyapin, A.R. Akhmatkhanov, V.Ya. Shur.
Optical parametric oscillator at MID-IR spectral region based on periodically polled LiNbO_3 pumped by $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ ceramic laser.

Optical parametric oscillator based on periodically polled $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ pumped by repetitively-pulsed $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ ceramic laser with a fiber-laser pumping was experimentally studied. The average power at the spectral range of 3.7–4.2 μm at the OPO output was 530 mW at the power of 7.9 W of the ceramic laser. The full efficiency of energy conversion from NIR-IR to MID-IR was 6.7% and differential efficiency was 8%. For parametric conversion of two-micron radiation from lasers (for example, on $\text{Tm}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ ceramics or $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ crystals) into the mid-IR range, KTP and KTA crystals with regular domain structures are also promising.

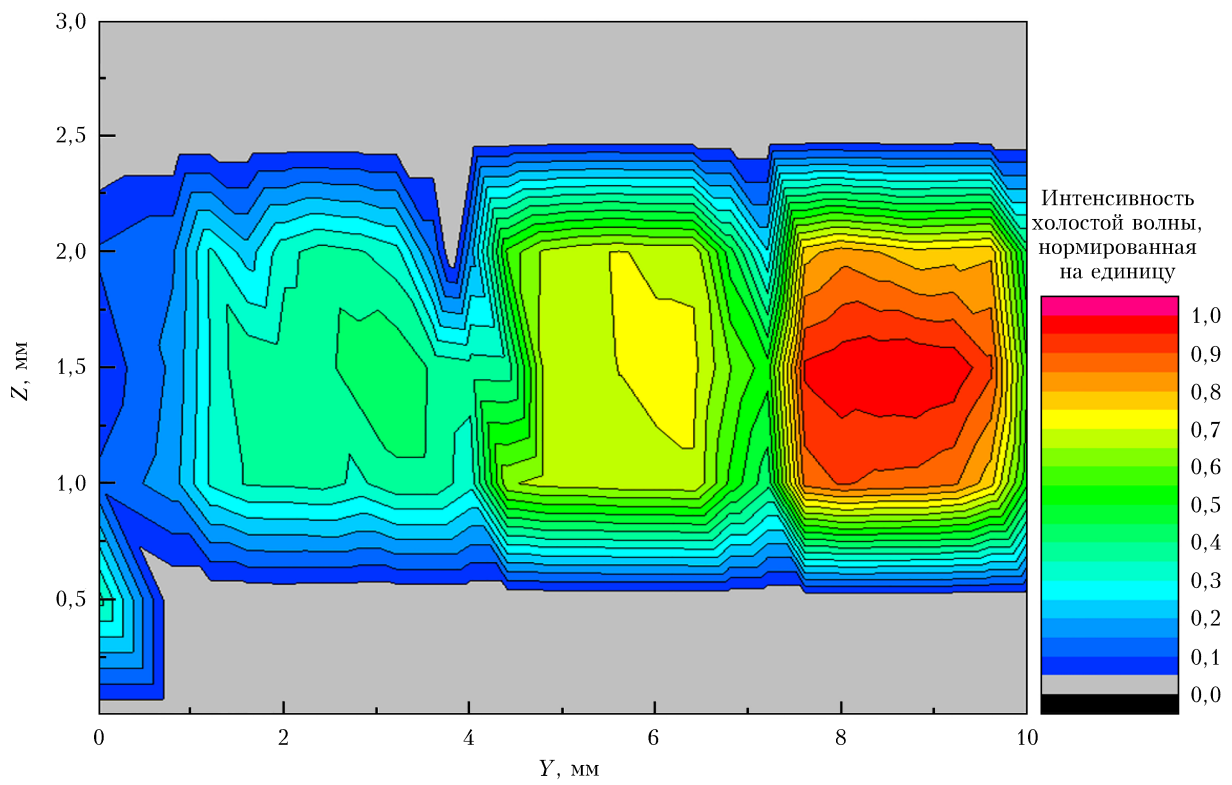


Рис. 3. Карта распределения интенсивности холостой волны излучения ПГС по апертуре PPMgO:LN структуры (шкала интенсивностей дана в относительных единицах)