

# Мощный киллогерцевый перестраиваемый ПГС среднего ИК диапазона на периодически поляризованном стехиометрическом танталате лития с накачкой на длине волны 1064 нм\*

А.Гайдаржиев, Д.Чучумишев, Д.Драганов, И.Бучваров

*Сообщается об одночастотном субнаносекундном оптическом параметрическом генераторе (ОПГ), основанном на периодически поляризованном стехиометрическом танталате лития (ППСТЛ), с накачкой усиленным излучением микрочип-лазера на длине волны 1064 нм с частотой повторения 0.5 кГц. На кристалле ППСТЛ длиной 11 мм с периодами доменов 30.2, 30.3 и 30.4 мкм при изменении температуры кристалла от 20 до 265°C получена перестройка длины волны от 2990 до 3500 нм. Высокая нелинейность использованной среды и большая апертура (2 мм) обеспечивают максимальную выходную энергию на частоте холостой волны ~0.5 мДж во всем диапазоне перестройки, что соответствует средней эффективности такого преобразования ~10.5% и средней мощности ~250 мВт. При длительности импульса накачки 0.88 нс получены субнаносекундные импульсы на частоте холостой волны.*

**Ключевые слова:** нелинейно-оптические материалы и приборы, оптические параметрические генераторы, периодически поляризованные нелинейные материалы

## 1. Введение

Субнаносекундные когерентные источники среднего ИК диапазона (2.5–4 мкм), сочетающие высокую среднюю мощность и высокую энергию импульса с широкой перестройкой, представляют большой интерес как для научных, так и промышленных применений, например дистанционного зондирования, молекулярной спектроскопии и разнообразных медицинских приложений, основанных на высоком поглощении воды в окрестности 3 мкм [1]. Простой и эффективный способ перекрытия этой спектральной области заключается в использовании устройств нелинейного преобразования частоты вниз, таких как оптические параметрические генераторы (ОПГ), накачиваемые неодимовыми лазерами, работающими в режиме модуляции добротности. Однако этот подход ограничен с точки зрения достижимых уровней энергии и эффективности из-за малого числа пробегов, которые возможны в резонаторе ОПГ за время, равное длительности импульса накачки. Одним из возможных путей преодоления этого принципиального недостатка является использование нелинейных кристаллов с более высокой нелинейностью. Недавно было продемонстрировано, что высоконелинейный материал CdSiP<sub>2</sub> в конфигурации некристического фазового синхронизма может быть использован в ОПГ с коротким резонатором для того, чтобы производить субнаносекундные сигнальный и холостой импульсы [2]. Однако этот материал имеет низкий порог

пробоя, что ограничивает достижимый уровень выходной энергии. Естественным выбором для таких ОПГ являются периодически поляризованные нелинейные кристаллы с исключительно большой нелинейностью и полным отсутствием пространственного сноса пучка.

Недавно были проведены исследования наносекундных ОПГ среднего ИК диапазона, основанных на периодически поляризованном ниобате лития (ППНЛ), которые либо имеют на высокой частоте повторения (10 кГц) очень «скромную» выходную энергию (несколько микроджоулей) [3], либо – на низкой частоте повторения (30 Гц) высокую выходную энергию (3.4 мДж), а следовательно, весьма небольшую выходную мощность [4]. Кроме того, обычно используемые длительности импульса накачки превышают 10 нс, что ограничивает пиковую мощность. К сожалению, из-за низкого порога фоторефрактивного повреждения ППНЛ находит лишь ограниченные применения при очень низких уровнях мощности.

В случае легирования кристаллических элементов из периодически поляризованного ниобата лития MgO (ППМгОНЛ) возможно их применение и при среднем уровне мощности. Среди нелинейных кристаллов, прозрачных в области 1–4 мкм и имеющих относительно высокую нелинейность, периодически поляризованный стехиометрический LiTaO<sub>3</sub> (ППСТЛ) обладает более высоким порогом фоторефрактивного повреждения и более низким коэрцитивным полем (1.7 кВ/мм по сравнению с 2 кВ/мм для ППМгОНЛ). Следовательно, кристалл ППСТЛ является перспективным материалом для эффективных устройств с высокой энергией импульса, работающих на киллогерцевой частоте повторения. Хотя этот кристалл успешно использовался в наносекундном ОПГ с высокой энергией, перестраиваемом в окрестности 2 мкм, его производительность при большей средней мощности, т. е. киллогерцевой частоте повторения, еще не изучена. Кроме того, работа ОПГ в окрестности 3 мкм гораздо интереснее в связи с пиком поглощения воды в этой спектральной области. Было высказано предположение, что кри-

\*Перевод В.В.Шувалова.

A.Gaydardzhiev, D.Chuchumishev, D.Draganov, I.Buchvarov. Department of Physics, Sofia University, 5 James Bourchier Blvd., BG-1164, Sofia, Bulgaria; e-mail: a.gaydardzhiev@phys.uni-sofia.bg, d.chuchumishev@phys.uni-sofia.bg, dimitar@phys.uni-sofia.bg, ivan.buchvarov@phys.uni-sofia.bg

Поступила в редакцию 28 ноября 2011 г., после доработки – 29 февраля 2012 г.

сталл ППСТЛ является подходящим кандидатом для более эффективных устройств с большей энергией в импульсе, и это продемонстрировано для импульсов накачки длительностью 10 нс при частоте повторения 30 Гц [5]. Наконец, ППСТЛ открывает привлекательную возможность для создания ОПГ с большой средней мощностью на высокой частоте повторения при использовании мощных субнаносекундных лазерных источников.

Ниже описан компактный субнаносекундный однорезонаторный ОПГ на основе ППСТЛ с коротким резонатором для среднего ИК диапазона, накачиваемый излучением одночастотного микрочип-лазера на Nd:YAG, усиленным в двухкаскадном стержневом усилителе, который обеспечивает высокую энергию импульса при относительно высокой частоте повторения и перестройку в окрестности полосы пикового поглощения воды. Насколько нам известно, это первый субнаносекундный ОПГ на основе ППСТЛ, перестраиваемый в этой весьма интересной для биологических приложений спектральной области, с такой энергией и частотой повторения, обладающий потенциалом для масштабирования энергии.

## 2. Экспериментальная установка

Использовался кристалл ППСТЛ длиной 11 мм, шириной 10 мм и толщиной (вдоль оси Z) 2 мм (Deltronic Crystal Industries Inc., NJ) с тремя разными поляризованными зонами с периодами инверсии доменов 30.2, 30.3 и 30.4 мкм, равномерно размещенных по ширине кристалла (рис.1). На рис.1 показана фотография структуры ППСТЛ с периодом инверсии доменов 30.4 мкм. Можно видеть относительно хорошую однородность кристаллической структуры в Y-сечении, ось X кристалла направлена вдоль оптической оси.

На кристалл были нанесены просветляющие покрытия для накачки, сигнальной и холостой волн. Длина резонатора ОПГ составляла 23 мм с плоскопараллельными зеркалами (рис.2,а). В качестве глухого зеркала ГЗ использовалось зеркало, покрытое серебром (отражение 96%–97% на каждой из трех длин волн). Выходным ответвителем (ВО) служило диэлектрическое зеркало на подложке YAG толщиной 3 мм с отражением свыше 99.9% между 1410 и 1830 нм (сигнальная волна) и пропусканием более 98% между 2875 и 4050 нм (холостая волна). Кристалл ППСТЛ накачивался через зеркало ВО, пропускание которого на длине волны 1064 нм составляло свыше 99%. Пучок накачки коллимировался до 1.3 мм (по уровню  $1/e^2$ ) в месте, где располагался кристалл ППСТЛ. Падающий пучок накачки отделялся от холостой волны дихроическим зеркалом с коэффициентом от-

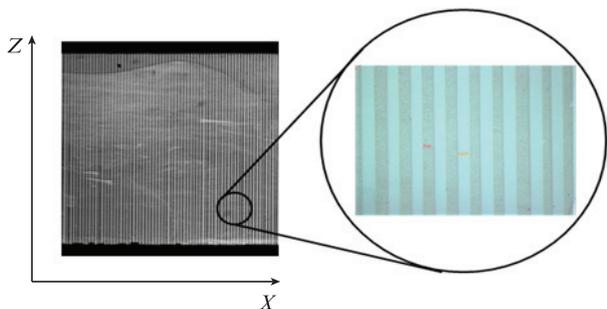


Рис.1. Фотографии структуры ППСТЛ с периодом инверсии доменов 30.4 мкм.

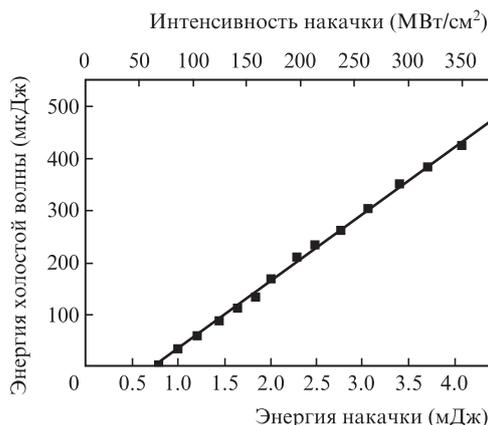
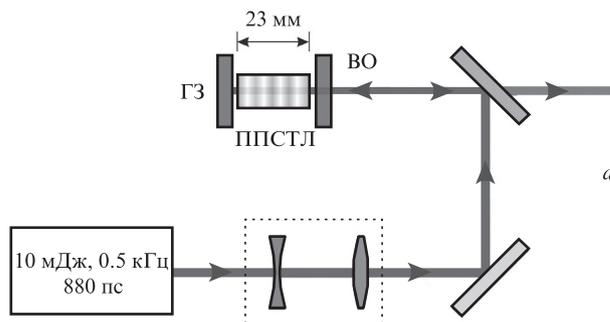


Рис.2. Схема оптического параметрического генератора (а), энергия холостой волны в зависимости от энергии накачки, падающей на кристалл ППСТЛ (б). Температура кристалла 250°C, выходная энергия холостой волны скорректирована на пропускание оптических элементов.

ражения 98% для накачки (p-поляризация) и пропусканием 80% на холостой длине волн. В качестве источника накачки использовалась усилительная система с задающим генератором на основе микрочип-лазера на Nd:YAG с диодной накачкой (240 мкДж, 0.88 нс, 0.5 кГц). Сигнал от генератора предварительно усиливался на одном проходе через кристалл Nd:YVO<sub>4</sub> толщиной 9 мм с торцевой накачкой, а дальнейшее усиление осуществлялось двумя двухпроходными каскадами с модулями поперечной накачки, в которых использовались 50-миллиметровые Nd:YAG-стержни [6]. Энергия импульса на выходе усилителя достигала 10 мДж при частоте повторения 0.5 кГц, длительности импульса 0.88 нс и высоком качестве пучка ( $M^2 < 1.4$ ). Максимальная энергия импульса, используемая для накачки ОПГ, составляла до 4.5 мДж, что определяется порогом разрушения глухого зеркала ОПГ. Изменяя задержку между импульсами накачки от усилителя и выходным импульсом микрочип-лазера, мы могли непрерывно изменять выходную энергию усилителя, не влияя на профиль пучка. После дихроического зеркала использовался дополнительный набор фильтров среднего ИК диапазона, чтобы исключить детектирование остаточного излучения накачки при измерении выходной мощности холостой волны.

## 3. Результаты и их обсуждение

Измеренная пороговая энергия накачки ОПГ составила 800 мкДж, что соответствует интенсивности импульса накачки  $\sim 68$  МВт/см<sup>2</sup> (рис.2,б). Это значение пороговой

интенсивности согласуется с теоретически предсказанным в работе [7] значением  $83 \text{ МВт/см}^2$  для случая одно-резонаторного ПГС с отражением накачки. Дифференциальная эффективность ОПГ составляет 12.6%. По сравнению с кристаллом  $\text{CdSiP}_2$ , использованным в очень похожем резонаторе в работе [2], порог ОПГ в нашем случае более чем в 30 раз выше, что объясняется значительно более высокой нелинейностью  $\text{CdSiP}_2$ . Максимальная интенсивность накачки в настоящей работе составляет  $\sim 370 \text{ МВт/см}^2$  (в шесть раз ниже порога повреждения ППСТЛ). Максимальная выходная энергия на частоте холостой волны в окрестности  $3 \text{ мкм}$  достигала  $470 \text{ мкДж}$ , что соответствует эффективности преобразования холостой волны 10.5% и полной квантовой эффективности преобразования 30%. Частота повторения разработанной системы ограничена оптимальной рабочей частотой микрочип-лазера (при  $0.5 \text{ кГц}$  мы получили самую высокую выходную мощность), а выходная мощность – порогом разрушения глухого (серебряного) зеркала (повреждение происходит за счет средней мощности, а не пиковой интенсивности). Хотя наш усилитель может работать на бо-

лее высоких частотах повторения, мы выбрали частоту  $0.5 \text{ кГц}$  в качестве наилучшего компромисса между частотой повторения и выходной энергией.

Изменяя температуру кристалла ППСТЛ от комнатной температуры до  $265^\circ\text{C}$ , мы смогли добиться непрерывной перестройки длины волны от  $2.99$  до  $3.5 \text{ мкм}$  для трех периодов инверсии доменов (рис.3). Экспериментальные результаты (точки на рис.3) находятся в очень хорошем согласии с теоретически рассчитанными кривыми (сплошные линии). В приведенных расчетах были использованы уравнения Селлмейера и выражения для теп-

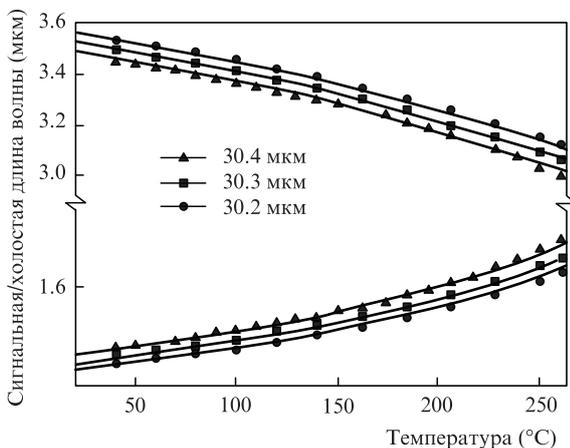


Рис.3. Температурная перестройка длины волны ОПГ для различных периодов инверсии доменов. Точки – измеренные данные, сплошные линии – расчетные перестроечные кривые.

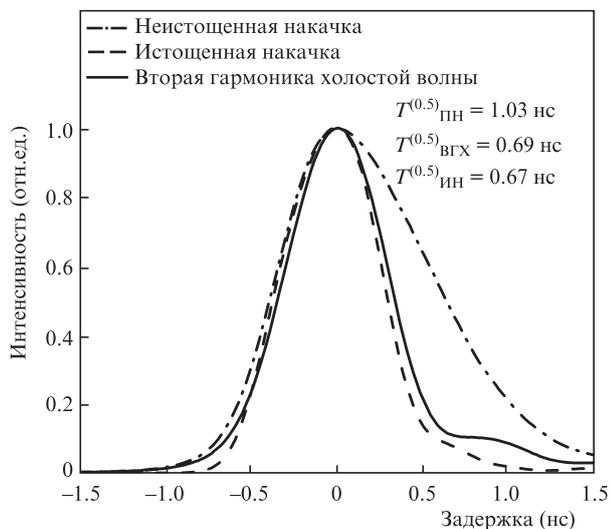


Рис.4. Форма импульсов падающей волны накачки (ПН), истощенной накачки (ИН) и второй гармоники холостой волны (ВГХ). Максимальная интенсивность всех импульсов дана для нулевого момента времени.

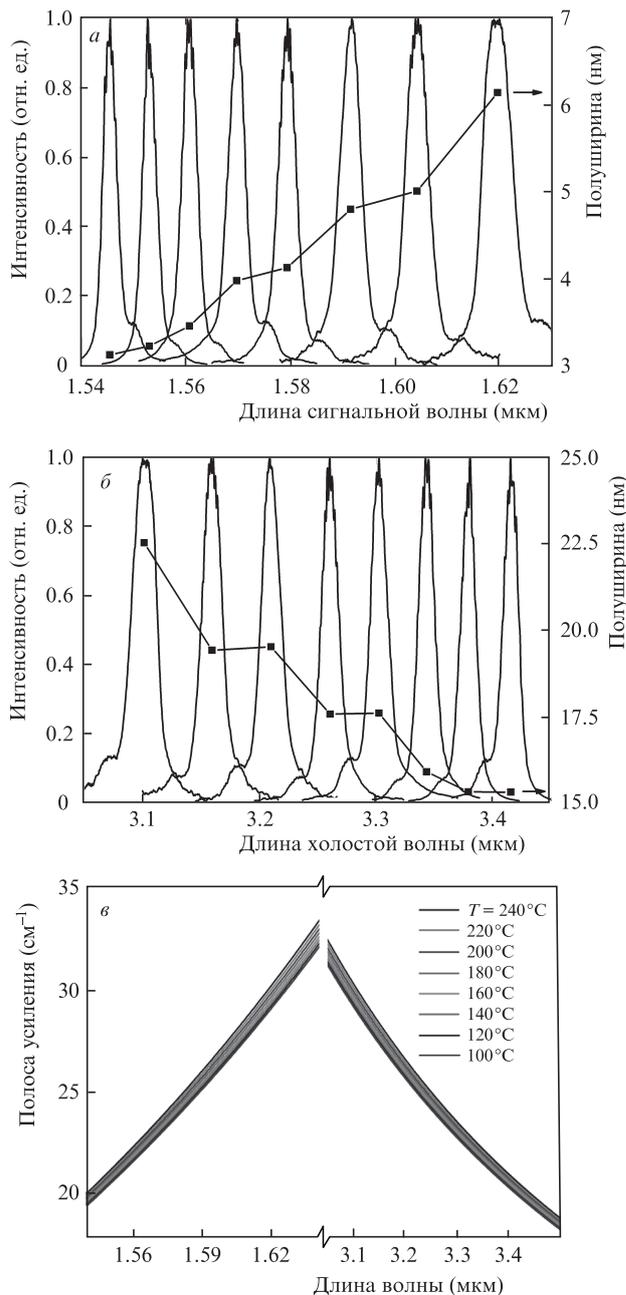


Рис.5. Измеренные спектры сигнала (первый спектр слева соответствует  $100^\circ\text{C}$ , последующие – соответствуют повышению температуры с шагом  $20^\circ\text{C}$ ) (а), реконструированные спектры холостой волны (первый спектр слева соответствует  $250^\circ\text{C}$ , справа от него – спектры при снижении температуры с шагом  $20^\circ\text{C}$ ) (б) и полоса усиления кристалла ППСТЛ, рассчитанная аналитически для кристалла длиной  $11 \text{ мм}$  при интенсивности накачки  $\sim 250 \text{ МВт/см}^2$  и температуре, соответствующей условиям описанного эксперимента (в).

лового расширения кристалла СТЛ, полученные в работе [8].

Для определения длительности холостого импульса мы удвоили частоту холостого импульса в кристалле КТР толщиной 5 мм и измерили длительность импульса второй гармоники. Его длительность на полувывоте  $T^{(0.5)}$  составила 0.69 нс (рис.4), измерение проводилось быстродействующим фотодиодом (InGaAs, время отклика ~75 пс) и цифровым осциллографом с полосой 1.5 ГГц (DDA 125, Lecroy Inc.). После деконволюции с функцией отклика измерительной системы (470 пс) длительность импульса на полувывоте на удвоенной частоте холостой волны оказалась равной 505 пс. При низкой эффективности преобразования во вторую гармонику это соответствует длительности импульса холостой волны 714 пс, которая, как и ожидалось, короче длительности импульса (~1 нс) неистощенной накачки (рис.4). Форма импульса истощенной накачки вместе с профилем неистощенного импульса и профилем импульса второй гармоники для холостой волны приведена на рис.4.

Спектр сигнала, выходящего с выходного ответвителя ОПГ, измерялся с помощью анализатора спектра (Anritsu, MS9710B) при периоде инверсии доменов 30.3 мкм в кристалле ППСТЛ (рис.5,а). Полуширина спектра составила от 3.1 нм при 100 °С до 6.14 нм при 240 °С, в то время как центральная длина волны спектра изменялась от 1545 до 1619 нм.

Для оценки ширины спектра холостой волны мы реконструировали ее спектр по сигналу с использованием соотношений Мэнли–Роу. Рассчитанные спектры показаны на рис.5,б. Полуширина рассчитанных спектров изменяется от 15.3 нм при 100 °С до 22.5 нм при 240 °С, а центральная длина волны спектра – от 3415 до 3101 нм. Поведение как сигнальной, так и холостой волны согласуется с полосой усиления, рассчитанной для квазисинхро-

низма в кристалле ППСТЛ длиной 11 мм при интенсивности накачки ~250 МВт/см<sup>2</sup> на длине волны 1064 нм (рис.5,в).

#### 4. Выводы

Продемонстрирован перестраиваемый субнаносекундный ОПГ на основе ППСТЛ, накачиваемый усиленным излучением одномодового лазера с пассивной модуляцией добротности и работающий с частотой повторения импульсов 0.5 кГц. Получены выходные импульсы с высокой энергией (0.5 мДж) при длительности импульса 714 пс, перестраиваемые по спектру вокруг пика поглощения воды между 2.99 и 3.5 мкм. Дальнейшее развитие метода с целью получения более высоких энергий подразумевает использование нелинейного кристалла большей апертуры и глухого зеркала с диэлектрическим покрытием.

Работа была поддержана проектом DDVU-02-104/20.12.2010, финансируемым Болгарским министерством образования, молодежи и науки, а также частично проектами DDVU-02-105/2010 и DRG02-4/2010 Научно-исследовательского фонда Болгарии.

1. Jean B., Bende T. *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources*, **89**, 511 (2003).
2. Petrov V., Marchev G., Schunemann P.G., Tyazhev A., Zawilski K.T., Pollak T.M. *Opt. Lett.*, **35** (8), 1230 (2010).
3. Dixit N., Mahendra R., Naraniya O.P., Kaul A.N., Gupta A.K. *Optics & Laser Technology*, **42** (1), 18 (2010).
4. Saikawa J., Miyazaki M., Fujii M., Ishizuki H., Taira T. *Opt. Lett.*, **33** (15), 1699 (2008).
5. Ishizuki H., Taira T. *Opt. Express*, **18** (1), 253 (2010).
6. Чучумишев Д., Гайдарджиев А., Трифонов А., Бучваров И. *Квантовая электроника*, **42** (6), 528 (2012).
7. Brosnan S., Byer R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **15** (6), 415 (1979).
8. Dolev I., Ganany-Padowicz A., Gayer O., Arie A., Mangin J., Gadret G. *Appl. Phys. B*, **96** (2), 423 (2009).