

# Лазер коротких импульсов на 795 нм с внутрирезонаторной генерацией суммарной частоты при использовании двух кристаллов MgO:PPLN\*

Чжиюн Ли, Жунцин Тань, Бося Янь, Цзиньтянь Бянь, Цин Е, Фанцзинь Нин, Лемао Ху

*Сообщается о создании перестраиваемого импульсного лазера ( $\lambda = 795$  нм) на основе параметрического генератора света с накачкой на 1064 нм от лазера, в котором используется внутрирезонаторная генерация суммарной частоты. В резонаторе находятся два кристалла MgO:PPLN с периодически поляризованной структурой (периоды 22.0 и 31.0 мкм). Кристалл с периодом 31.0 мкм используется для генерации излучения среднего ИК диапазона, а другой кристалл служит для сложения частот этого ИК излучения и излучения накачки. Длительность импульса лазера на 795 нм составляет 3.6 нс, частота следования импульсов – 35.3 кГц. Пиковая мощность лазера достигает 2.8 кВт при ширине спектральной линии 0.35 нм. Пороговая мощность накачки лазера на 795 нм составляет 1.4 Вт, а эффективность оптического преобразования исходного излучения на 1064 нм в излучение на 795 нм равна 5.7% при максимальной выходной мощности. Предлагаемый лазер может служить конкурентоспособным источником излучения ближнего ИК диапазона для исследования рубидиевого лазера с диодной накачкой.*

**Ключевые слова:** генерация суммарной частоты, периодически поляризованная структура, параметрический генератор света, лазер на парах щелочных металлов, суррогатный лазер.

## 1. Введение

Импульсный лазер ближнего ИК диапазона (700–900 нм) можно использовать как суррогатный источник излучения для лазеров на парах щелочных металлов с диодной накачкой (diode pumped alkali lasers, DPAL). В настоящее время такими источниками служат лазер на александрите, титан-сапфировый лазер и лазеры на красителях [1–3]. Нелинейная оптика открывает альтернативный путь получения нужной длины волны. Использование квазисинхронизма в кристаллах с периодически поляризованной структурой является одним из эффективных методов создания параметрических генераторов света (ПГС). Периодически поляризованный ниобат лития, легированный MgO (MgO:PPLN), с большим нелинейным коэффициентом второго порядка ( $d_{33}$ ) – один из типичных примеров кристалла, обеспечивающего квазисинхронизм [4]. Он имеет широкий диапазон прозрачности (от 0.35 до 5 мкм) и высокую степень однородности. ПГС на MgO:PPLN с накачкой от неодимового лазера (1064 нм) может эффективно генерировать излучение среднего ИК диапазона

с длиной волны от 2.4 до 4.2 мкм [5, 6]. При сложении частот холостого излучения и ИК излучения лазера накачки можно получить длину волны, перестраиваемую от 737 до 845 нм. В 2012 г. Кавита Деви и др. [7] сообщили о создании лазера непрерывного действия с диапазоном перестройки от 775 до 807 нм. Кристалл MgO:PPLN и легированный MgO стехиометрический периодически поляризованный танталит лития (MgO:SPPLT) использовались для ПГС и генерации суммарной частоты (ГСЧ) соответственно. Оптическая эффективность преобразования излучения лазера на 1064 нм в лазерное излучение ближнего ИК диапазона составила около 11.8% при пороговой мощности накачки 7.5 Вт.

Среди кристаллов, служащих для генерации суммарной частоты, MgO:PPLN отличается высокой эффективностью преобразования и простотой конфигурации резонатора. В 2015 г. Тае-Юнг Цзен и др. [8] сообщили о получении выходной эффективности 8.0% при ГСЧ на 522 нм. Учитывая, что кристаллы MgO:PPLN применимы как для ПГС, так и для ГСЧ, можно реализовать ПГС/ГСЧ-лазер только на MgO:PPLN. В 1998 г. о таком ПГС/ГСЧ-лазере на PPLN сообщили Вальтер и др. [9]. Ими получено непрерывное лазерное излучение мощностью 2.5 Вт на длине волны 629 нм путем сложения частоты лазера на 1064 нм с частотой сигнального пучка. Оптическая эффективность и пороговая мощность накачки составили 21.2% и 6.3 Вт соответственно. В 2014 г. Симон Миет и др. [10] сообщили о создании на кристалле MgO:PPLN перестраиваемого «красного» лазера непрерывного действия с выходной мощностью более 1 Вт и оптической эффективностью 11.5%. Соответствующая пороговая мощность накачки составила 8 Вт. Кристаллы указанных ПГС/ГСЧ-лазеров выполняют две функции: параметрическое преобразование излучения с длиной волны 1386 нм в излучение с длиной волны 1445 нм посредством ПГС, а затем сложение частот пучка накачки и сигнального пучка.

\* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

**Zhiyong Li.** Department of High Power Gas Laser, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China; State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, China

**Rongqing Tan, Fangjin Ning, Liemao Hu.** Department of High Power Gas Laser, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China; University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China; e-mail: rongqingtan@163.com

**Boxia Yan.** Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

**Jintian Bian, Qing Ye.** State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, China

Поступила в редакцию 30 сентября 2018 г., после доработки – 22 октября 2018 г.

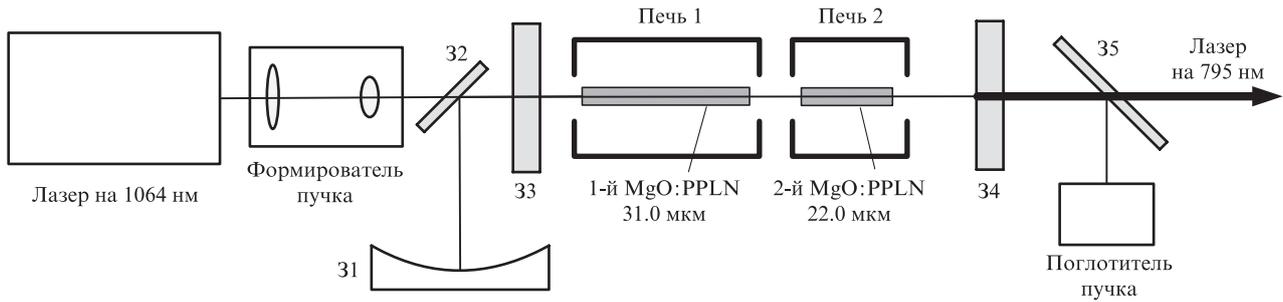


Рис.1. Экспериментальная установка.

Однако все описанные выше лазеры работают в непрерывном режиме, тогда как суррогатный лазер для DPAL должен работать в режиме генерации коротких импульсов с малой длительностью и высокой пиковой мощностью. Время жизни верхнего уровня энергии DPAL обычно составляет десятки наносекунд, поэтому малая длительность импульса обеспечивает преимущества при моделировании распространения света в DPAL.

В настоящей работе описан ПГС/ГСЧ-лазер с компактной конфигурацией, в котором путем внутррезонаторного сложения частот излучения накачки и холостого пучка генерируется излучение на 795 нм с низким порогом и малой длительностью импульса. Предложенный лазер является суррогатным для рубидиевого DPAL.

## 2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рис.1. Источником накачки служит лазер на основе задающего генератора и усилителя мощности (длина волны 1064 нм); параметр качества пучка  $M^2 = 1.2$ . Частота следования импульсов и их длительность составили 35.3 кГц и 5.8 нс соответственно. После формирования пучка обращенным телескопом излучение лазера вводится в резонатор. Диаметр фокального пятна равен 0.76 мм. В резонаторе находятся два кристалла MgO:PPLN, легированных MgO с концентрацией 5%. Излучение лазера на 1064 нм в резонаторе играет две роли. Одна из них – накачка кристалла MgO:PPLN с целью параметрической генерации света среднего ИК диапазона. Другая роль состоит в поставке фотонов для ГСЧ. Периоды структуры кристаллов составляют 31.0 мкм (первый MgO:PPLN) и 22.0 мкм (второй MgO:PPLN) при комнатной температуре. Типы фазового синхронизма в кристаллах:  $e \rightarrow e + e$  и  $e + e \rightarrow e$ . Первый кристалл MgO:PPLN используется для генерации излучения среднего ИК диапазона ( $\omega_{1064} = \omega_{1610} + \omega_{3145}$ ). Размер периодической структуры –  $2 \times 2$  мм при длине кристалла 50 мм. Грани кристалла имеют антиотражающее покрытие на 1064 нм и в диапазоне 1600–4000 нм. Второй кристалл MgO:PPLN используется для генерации суммарной частоты пучка на 1064 нм и холостого пучка ПГС ( $\omega_{795} = \omega_{1064} + \omega_{3145}$ ). Размер периодической структуры –  $2 \times 1$  мм при длине кристалла 25 мм. На грани кристалла нанесено покрытие с антиотражающими свойствами на длинах волн 795 и 1064 нм и в диапазонах 1300–1700 нм и 3000–4000 нм. Температура обоих кристаллов контролируется с точностью 0.1 °C.

Плоско-вогнутый резонатор образован четырьмя зеркалами: 31 – высокоотражающее зеркало ( $R > 99.8\%$ ) на длине волны 795 нм; 32 – дихроичное зеркало с углом падения 45°, его покрытие является антиотражающим на

1064 нм и высокоотражающим на 795 нм ( $R > 99.8\%$ ); 33 и 34 – плоские зеркала с одинаковым покрытием, которое хорошо отражает ( $R > 99.5\%$ ) в диапазонах длин волн 3000–3600 нм и 1300–1600 нм и является антиотражающим на длине волны 1064 нм ( $T > 99.0\%$ ). Зеркала 33 и 34 образуют резонатор ПГС длиной 12 см. Высокая отражающая способность этих зеркал на длинах волн сигнала и холостого излучения ПГС обеспечивает низкий порог генерации фотонов среднего ИК диапазона. Резонатор ГСЧ образован зеркалами 31 и 34. Оптическая длина пути между ними (без учета других оптических элементов) равна 18 см. Коэффициент отражения зеркала 34 на длине волны 795 нм составляет 30%. Радиус кривизны зеркала 31 равен 200 мм. Зеркало 35 служит фильтром для выделения лазерного излучения на 795 нм.

## 3. Результаты экспериментов

Процесс генерации суммарной частоты начинается с проверки работы первого кристалла MgO:PPLN. При температуре 51.8 °C возникает когерентное излучение на длине волны 3145 нм. Путем перестройки температуры второго кристалла за счет ГСЧ можно получить лазерное излучение с длиной волны 795 нм, зависимость выходной мощности которого от температуры при мощности накачки 6.8 Вт показана на рис.2.

Из рисунка видно, что оптимальная температура второго кристалла составляет 40.3 °C. При температуре ниже 35 °C в спектре излучения на 795 нм наблюдается много пиков, а мощность генерации резко снижается (составляет лишь 19.5% от максимального значения при уменьшении температуры всего лишь на 5 °C ниже оптималь-

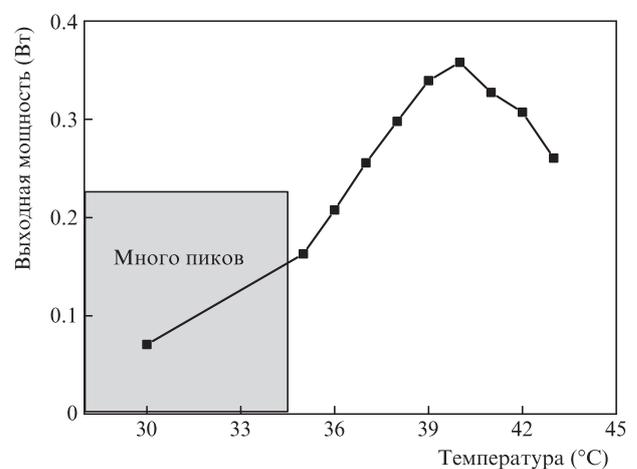


Рис.2. Зависимость выходной мощности излучения на 795 нм от температуры второго кристалла MgO:PPLN.

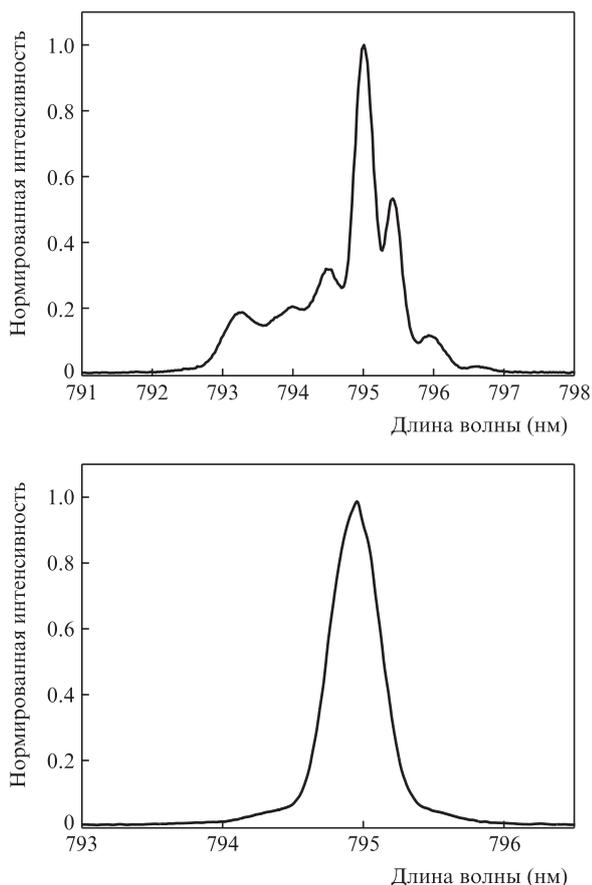


Рис.3. Типичные спектры излучения при температурах второго кристалла 20 (а) и 40 °С (б).

ной). Для объяснения этого явления мы измерили спектры излучения при различных температурах второго кристалла (рис.3). Видно, что крыло спектра содержит множество пиков. При температурах от 35.0 до 45.0 °С (пик хотя и один) наблюдается сдвиг центральной длины волны, зависящий от установленной температуры. Скорость этого сдвига составляет примерно 50 пм/°С. Указанные эффекты в основном обусловлены рассеянием и шириной линии «затравочного» света.

Для случая, когда температура первого кристалла равна 51.8 °С, а второго – 40.3 °С, на рис.4 показана зависи-

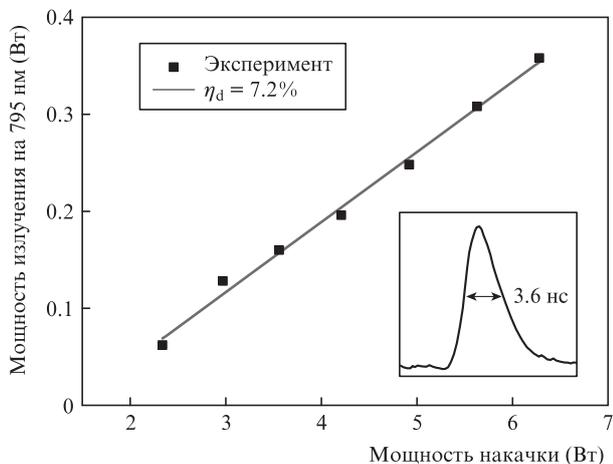


Рис.4. Выходная мощность излучения в зависимости от мощности накачки. На вставке – форма импульса при максимальной выходной мощности.

мость мощности излучения на длине волны 795 нм от мощности излучения лазера на 1064 нм. Как следует из рисунка, дифференциальная эффективность  $\eta_d$  составляет 7.2%, а пороговая мощность – 1.4 Вт. При мощности накачки 6.8 Вт оптическая эффективность равна 5.7%, а усредненная выходная мощность – 358 мВт. Полученная эффективность ниже, чем в работах [8] и [10]. Основная причина этого состоит в том, что грани первого кристалла не имеют антиотражающего покрытия на 795 нм. Коэффициент отражения граней на 795 нм составил примерно 35%, что явилось причиной дополнительных потерь в резонаторе лазера на этой длине волны. В дальнейшем мы постараемся уменьшить потери резонатора путем нанесения антиотражающего покрытия на длине волны 795 нм на грани первого кристалла.

Необходимо подчеркнуть, что благодаря импульсному режиму накачки средняя пороговая мощность генерации достаточно низкая. Форма генерируемого импульса показана на вставке к рис.4. Длительность импульса при максимальной выходной мощности составляет 3.6 нс, а соответствующая пиковая мощность – 2.8 кВт. Измерение спектра с использованием волоконной спектроскопии (разрешение 0.02 нм) показало, что ширина линии лазера на 795 нм при максимальной выходной мощности равна 0.35 нм.

Характеристики генерируемого пучка и размер пятна фокусировки приведены на рис.5. Параметр качества пучка  $M^2$  составляет 5.4 и 6.2 в направлении осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Фактически излучение среднего ИК диапазона генерируется в ПГС. Поэтому длина волны этого излучения может перестраиваться за счет изменения температуры первого кристалла. При сложении частоты излучения среднего ИК диапазона с частотой накачки изменяется центральная длина волны излучения суммарной частоты. При перестройке длины волны температура первого кристалла MgO:PPLN изменяется сообразно температуре второго кристалла. В экспериментах нами получена центральная длина волны лазера 797.32 нм при температуре второго кристалла 75.0 °С. Соответственно, для получения наилучшей эффективности ГСЧ температура

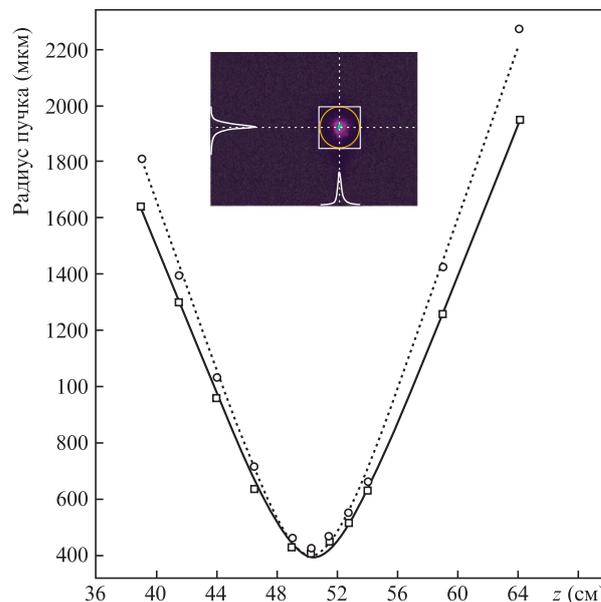


Рис.5. Качество пучка и размер пятна фокусировки.

первого кристалла MgO:PPLN изменялась от 51.8 до 28.0 °С. При достижении наилучшей эффективности ГСЧ полная мощность излучения может оставаться неизменной при перестройке длины волны ГСЧ.

#### 4. Заключение

Создан перестраиваемый лазер со сложением частот на двух кристаллах MgO:PPLN, генерирующий импульсы с частотой следования 35.2 кГц на длине волны около 795 нм. Параметр  $M^2$  составляет 5.4 и 6.2 в направлении осей  $x$  и  $y$  соответственно. Пиковая мощность генерации равна 2.8 кВт при длительности импульса 3.6 нс, тогда как средняя пороговая мощность накачки составляет 1.4 Вт. Центральная длина волны лазерного излучения может изменяться в результате регулирования температуры кристаллов. Благодаря высокой пиковой мощности и малой длительности импульса такой лазер может быть конкурентоспособным источником излучения ближнего ИК диапазона для исследования рубидиевого лазера с диодной накачкой.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (гранты №61505212, 61775215 и 61875198), а также фондом Государственной ведущей лаборатории импульсных лазерных технологий высокой мощности (грант №SKL2016KF02).

1. Beach R.J., Krupke W.F., Kanz V.K., Payne S.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **21**, 2151 (2004).
2. Zweiback J., Krupke W.F. *Proc. SPIE*, **7005**, 700525 (2008).
3. Sulham C.V., Pitz G.A., Perram G.P. *Appl. Phys. B*, **101**, 57 (2010).
4. Quan S., Xin D., Chunpeng S., Sujia Y., Bin L., Ce S., Xuanyi Y., Wuqi W., Jianquan Y. *Opt. Express*, **20**, 8041 (2012).
5. Yu Y., Chen X., Zhao J., Wang C., Wy C., Jin G. *Opt. Eng.*, **53**, 061604 (2014).
6. Sun X., Bi Y., Yan B., Zheng G., Wang D., Wang H., Qi Y., Fang T. *Chin. J. Lasers*, **40**, 0302009 (2013).
7. Kavita D., Kumar S.C., Zadeh M.E. *Opt. Lett.*, **37**, 5049 (2012).
8. Jeong T.Y., Kim S.H., Kim G.H., Yee K.J. *Opt. Express*, **23**, 25620 (2015).
9. Walter R.B., Jason I.A., Lawrence E.M., Richard W.W. *Opt. Lett.*, **23**, 207 (1998).
10. Simon M., Angus H., Thomas H. *Opt. Express*, **22**, 11182 (2014).