

Эффективная параметрическая генерация в диапазоне 8–10 мкм при накачке излучением фемтосекундного лазера на хром-форстерите

В.М.Гордиенко, С.С.Гречин, А.А.Иванов, А.А.Подшивалов, Е.В.Раков

Реализована эффективная параметрическая генерация в диапазоне 8–10 мкм в кристалле $LiInS_2$ при накачке излучением фемтосекундного лазера на хром-форстерите. Впервые достигнута эффективность преобразования 0.8% на длине волны 9.5 мкм. Также впервые достигнута 75%-ная эффективность ГВГ излучения хром-форстеритового лазера в кристалле LBO.

Ключевые слова: параметрический генератор света, фемтосекундные импульсы, нелинейная оптика.

Прогресс в разработке мощных фемтосекундных лазеров нового поколения на титан-сапфире, хром-форстерите, иттербиевом волокне с диодной накачкой стимулировал новые исследования по созданию высокоэффективных параметрических генераторов света (ПГС), работающих в среднем ИК диапазоне. Такие источники необходимы для изучения динамики межзонных переходов в полупроводниках и квантоворазмерных структурах [1], для контроля в реальном времени динамики внутримолекулярного перераспределения колебательной энергии [2] и изучения особенностей процесса фотодиссоциации многоатомных молекул при селективном воздействии интенсивного лазерного излучения [3], а также для исследования процесса генерации высоких гармоник [4]. Кроме того, мощные сверхкороткие импульсы среднего ИК диапазона могут быть основой для создания спектроскопических фемтосекундных лидаров [5]. Еще одно их важное применение связано с задачей создания сверхмощных лазерных систем в десятимикронном диапазоне, когда ПГС используются для формирования затравочных сверхкоротких импульсов с целью их последующего усиления в N_2O - или CO_2 -усилителе [6], что, естественно, требует высоких эффективностей преобразования излучения накачки в ИК диапазон.

При создании ПГС, работающего в диапазоне 8–10 мкм, использование хром-форстеритового лазера ($Cr^{4+} : Mg_2SiO_4$ ($Cr : F$)) в качестве источника накачки с длиной волны генерации $\lambda = 1.24$ мкм имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием фемтосекундных лазеров других типов [7]. В большинстве нелинейных кристаллов, во-первых, отсутствует двухфотонное поглощение накачки, а во-вторых, в соответствии с правилом Менли–Роу, достигается более высокая эффективность преобразования.

Параметрическая генерация излучения в диапазоне 8–10 мкм реализована в кристаллах $AgGaS_2$, $HgGa_2S_4$ и

$Cd_{0.54}Hg_{0.46}Ga_2S_4$ с использованием $Cr : F$ -лазера в качестве источника накачки [8, 9]. Достигнутая при этом эффективность преобразования длины волны излучения в диапазон 8–10 мкм не превышала 0.2%. Анализ показывает, что теоретический предел эффективности преобразования для излучения, имеющего гауссов профиль во времени и пространстве, составляет 3%–4%.

Целью данной работы явилось создание оптимальной схемы эффективной параметрической генерации света в диапазоне 8–10 мкм с накачкой излучением фемтосекундного хром-форстеритового лазера.

Для эффективной параметрической генерации света в диапазоне 8–10 мкм необходимо мощное (с интенсивностью в единицы $ГВт/см^2$) затравочное излучение на длине волны 1.4–1.5 мкм, тогда как генерация суперконтинуума [10] или параметрическая люминесценция [8] позволяли реализовать интенсивности ~ 0.1 $ГВт/см^2$. Использование ПГС в диапазоне 1.4–1.5 мкм с инжекцией излучением суперконтинуума (0.8–1.1 мкм) позволит существенно повысить эффективность генерации затравочного излучения.

Большая эффективность параметрической генерации света, так же как и в случае генерации гармоник [11], может быть достигнута в кристалле, обладающем не только высокой нелинейностью, но и большой спектральной шириной синхронизма. В экспериментальных работах до настоящего времени времени не затрагивался также вопрос о роли коэффициента кубической нелинейности n_2 в процессах параметрической генерации света, при этом очевидно, что, как и в случае генерации гармоник [12, 13], его влияние будет одним из основных факторов, ограничивающих эффективность преобразования. Максимальная эффективность преобразования при условии сохранения минимальной длительности достигается в случае параметрической генерации света в кристалле, в котором сочетается большая спектральная ширина синхронизма и высокая квадратичная и малая кубическая нелинейности.

Для определения оптимальных кристаллов для ПГС в диапазоне 8–10 мкм проведена серия численных экспериментов по преобразованию частоты в различных нелинейных кристаллах с использованием спектральной модели [14]. Отсутствие данных о коэффициенте n_2 для

В.М.Гордиенко, С.С.Гречин, А.А.Подшивалов, Е.В.Раков. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: gord@femtorsv.phys.msu.ru, grechin@psi.phys.msu.ru, rakov@femto.phys.msu.ru
А.А.Иванов. Центр фотохимии РАН, Россия, 117421 Москва, ул. Новаторов, 7а

большинства кристаллов среднего ИК диапазона не позволило учесть его влияние. Наибольшая теоретическая эффективность преобразования достигается в кристаллах LiInS_2 и HgGa_2S_4 . Известно, что из исследованных кристаллов среднего ИК диапазона LiInS_2 имеет наименьшую длину волны коротковолнового края поглощения (450 нм) и в 100 раз меньше двухфотонное поглощение на длине волны 0.8 мкм, чем в кристалле AgGaS_2 [15]. Эти факты позволяют надеяться на то, что коэффициент n_2 для LiInS_2 также будет наименьшим. Поэтому мы предполагаем, что при накачке излучением фемтосекундного $\text{Cr}:\text{F}$ -лазера оптимальным кристаллом для ПГС в диапазоне 5–10 мкм является кристалл LiInS_2 .

Оптическая схема генератора в диапазоне 8–10 мкм с промежуточным каскадом ПГС затравочного излучения в диапазоне 1.4–1.5 мкм представлена на рис.1. Источником накачки служит $\text{Cr}:\text{F}$ -лазер ($\lambda = 1.24$ мкм, $E = 350$ мкДж, $\tau = 140$ фс), часть излучения которого преобразуется во вторую гармонику и используется для накачки схемы промежуточного ПГС, генерирующего требуемое излучение с $\lambda = 1.4$ –1.5 мкм. Вторая гармоника генерируется в кристалле LBO ($\varphi = 0^\circ$, $\theta = 87^\circ$, ssf-тип [16]) длиной 5 мм.

На рис.2. представлена экспериментально измеренная зависимость эффективности ГВГ в кристалле LBO от интенсивности падающего излучения. Максимальная эффективность преобразования составляет 78%. Уширение спектра второй гармоники, обусловленное действием керровской нелинейности, не наблюдается вплоть до эффективностей преобразования 75%. Стоит отметить, что эти эффективности преобразования превышают полученные нами ранее в работе [13], что обусловлено как большей длиной кристалла, так и его лучшим оптическим качеством.

В используемой схеме промежуточного генератора (ПГС1) генерация в диапазоне 1.4–1.5 мкм реализовывалась с помощью пары последовательно установленных кристаллов LBO ($\varphi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, ssf-тип) длиной 4 мм каждый, что обеспечивало максимальную эффективность преобразования (оптимальная расчетная длина кристалла $L_{\text{opt}} \sim 8$ мм). Для повышения эффективности преобразования в ПГС1 в качестве затравки на сигналь-

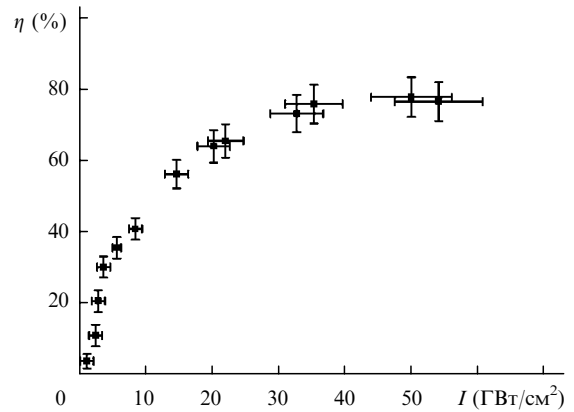


Рис.2. Зависимость эффективности ГВГ излучения фемтосекундного хром-форстеритового лазера в кристалле LBO длиной 5 мм от интенсивности накачки.

ной волне инжектировалась часть излучения суперконтинуума (0.8–1.1 мкм), получаемого при фокусировке части излучения второй гармоники (~ 7 мкДж) в пластину SiO_2 толщиной 5 мм.

Энергия излучения суперконтинуума в диапазоне 0.8–1.1 мкм составляла 0.1–10 нДж. При энергии второй гармоники 260 мкДж энергия излучения с $\lambda = 1.4$ мкм была равна 7 мкДж, его длительность составляла 80 ± 20 фс. Для ПГС, работающего в диапазоне 8–10 мкм (ПГС2), использовался непросветленный кристалл LiInS_2 ($\varphi = 35^\circ$, $\theta = 90^\circ$, fsf-тип) длиной 3 мм. Накачка осуществлялась оставшимся после ГВГ основным излучением ($\lambda = 1.24$ мкм), а для инъекции на сигнальной волне использовался импульс холостой волны промежуточного ПГС (1.4–1.5 мкм). Измерения энергии производились с помощью охлаждаемого (до температуры -200°C) CdHgTe -приемника, калибровка которого осуществлялась на длине волны 1.5 мкм. Наличие перед приемником дисперсионных фильтров позволило оценить спектр ИК излучения, а также измерить зависимость эффективности преобразования от длины волны генерируемого излучения. С изменением эффективности ГВГ изменялось соотношение между основным излучением, используемым для накачки ПГС с $\lambda = 8$ –10 мкм, и второй гармоникой,

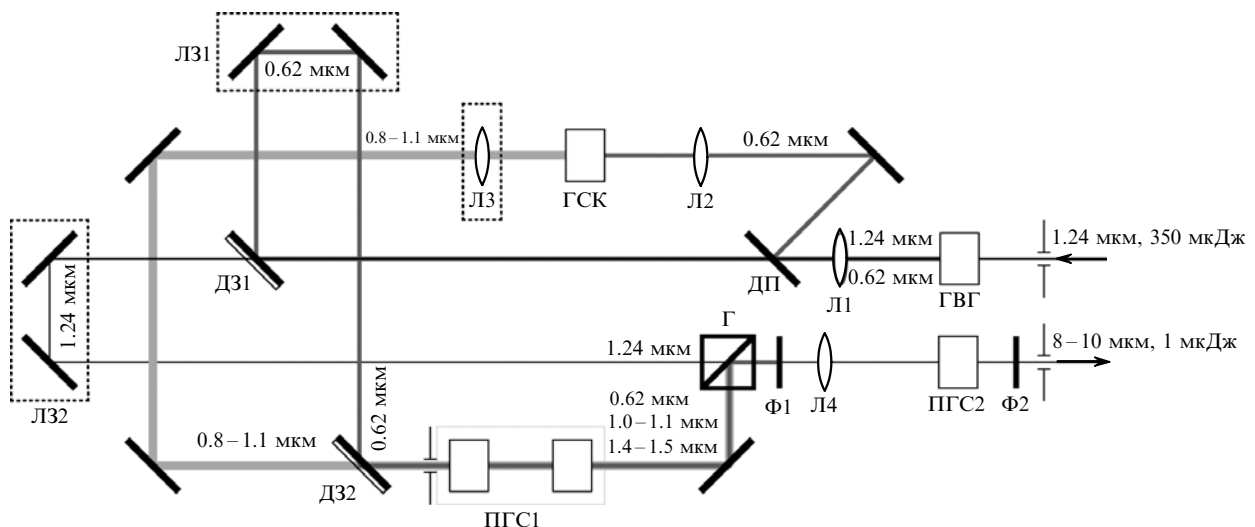


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

ДЗ1,2 – дихроичные зеркала ($R = 100\%$ на $\lambda = 620$ нм и $T = 100\%$ на $\lambda = 1240$ нм); Л1–Л4 – линзы ($f_1 = 1000$ мм, $f_2 = f_3 = 100$ мм, $f_4 = 154$ мм); ЛЗ1, ЛЗ2 – линии задержки; Ф1 – фильтр ИКС3; Ф2 – дисперсионный фильтр; Г – призма Глана; ГВГ – генератор второй гармоники; ГСК – генератор суперконтинуума; ПГС1, ПГС2 – нелинейно-оптические кристаллы.

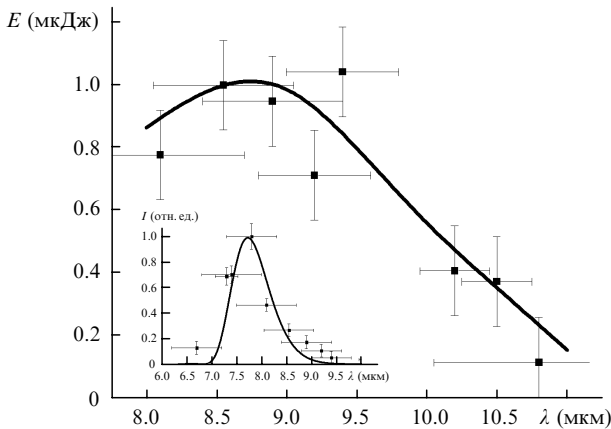


Рис.3. Экспериментальная (точки) и теоретическая (кривая) зависимости энергии излучения, генерируемого в диапазоне 8–11 мкм в кристалле LiInS_2 длиной 3 мм при накачке излучением фемтосекундного хром-форстеритового лазера, от длины волны (на вставке – спектр 8-микрометрового излучения).

применяемой для генерации инъекции в диапазоне 1.4–1.5 мкм. Таким образом осуществлялась оптимизация эффективности преобразования обоих ПГС.

На рис.3 представлены зависимости энергии генерируемого излучения в диапазоне 8–11 мкм и спектр 8-микрометрового излучения. Измерения проводились при следующих параметрах излучения накачки и инъекции: $\lambda_p = 1.24$ мкм, длительность импульса $\tau_p = 100 - 140$ фс, энергия $E_p = 160$ мкДж, интенсивность $I_p = 140 - 200$ ГВт/см²; $\lambda_{in} = 1.4 - 1.5$ мкм, $\tau_{in} = 80$ фс, $E_{in} \sim 0.2 - 1$ мкДж, $I_{in} = 0.2 - 1$ ГВт/см². Точками обозначены экспериментальные данные, линиями – результат расчета на базе спектральной модели. Максимальная энергия $E = 1 \pm 0.5$ мкДж была достигнута на длине волны 9.5 мкм, что соответствует эффективности преобразования по энергии 0.6 %, а по квантам – 4.6 %. С учетом потерь при отражении от граней непросветленного кристалла эффективности преобразования составили 0.8 % и 5.8 % соответственно. Коэффициент усиления сигнальной волны (1.4–1.5 мкм) был равен 45. Ширина спектра импульса, генерируемого на длине волны 8 мкм, равнялась 880 нм, что соответствует длительности спектрально-ограниченного импульса 130 фс. Падение эффективности

преобразования с увеличением длины волны обусловлено увеличением поглощения кристалла [15] и соотношением Менли – Роу.

Использование Cr:F -лазера в качестве источника накачки, схемы с промежуточным ПГС и оптимального кристалла LiInS_2 позволило достичь в диапазоне 8–11 мкм высокой эффективности преобразования, близкой к 1 %. Расчеты, подтвержденные полученными в работе экспериментальными результатами, показывают, что предельная эффективность ПГС на длине волны 10 мкм, равная 3 %, достижима в кристалле LiInS_2 длиной 4 мм. В кристалле LBO длиной 5 мм также реализована ГВГ в режиме сохранения качества генерируемого излучения с эффективностью 75 %.

Работа поддержана грантами РФФИ № 05-02-16476 и № 03-02-16973.

1. Elsaesser T. *Appl. Phys. A*, **79**, 1627 (2004).
2. Малиновский А.Л., Макаров А.А., Рябов Е.А. *Письма в ЖЭТФ*, **80** (8), 605 (2004).
3. Апатин В.М., Компанец В.О., Лаптев В.Б., Матвеев Ю.А., Рябов Е.А., Чекалин С.В., Летохов В.С. *Письма в ЖЭТФ*, **80** (2), 104 (2004).
4. Shan B., Cavalieri A., Chang Z. *Appl. Phys. B*, **74**, S23 (2002).
5. Гордиенко В.М., Прялкин В.И., Холодных А.И. *Квантовая электроника*, **30** (9), 839 (2000).
6. Бравый Б.Г., Васильев Г.К., Гордиенко В.М., Макаров Е.Ф., Платоненко В.Т., Чернышев Ю.А. *Препринт физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова № 2* (М., 2004).
7. Гордиенко В.М. *Препринт физического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова № 13* (М., 2000).
8. Rotermund F., Petrov V. *Opt. Lett.*, **25** (10), 746 (2000).
9. Petrov V., Rotermund F. *Opt. Lett.*, **27** (19), 1705 (2002).
10. Rotermund F., Petrov V., Noack F., Isaenko L., Yelissev A., Lobanov S. *Appl. Phys. Lett.*, **78** (18), 2623 (2001).
11. Гречин С.С., Прялкин В.И. *Квантовая электроника*, **33**, 737 (2003).
12. Begishev I.A., Kalashnikov M., Karpov V., Nickles P., Schonagel H., Kulagin I.A., Usmanov T. *J. Opt. Soc. Am. B*, **21** (2), 318 (2004).
13. Гордиенко В.М., Гречин С.С., Иванов А.А., Подшивалов А.А. *Квантовая электроника*, **35**, 525 (2005).
14. Гречин С.С. *Квантовая электроника*, **35**, 257 (2005).
15. Fossier S., Salaun S., Mangin J., Bidault O., Thenot I., Zondy J.J., Chen W., Rotermund F., Petrov V., Petrov P., Henningsen J., Yelissev A., Isaenko L., Lobanov S., Balachninaite O., Slekys G., Sirutkaitis V. *J. Opt. Soc. Am. B*, **21** (11), 1981 (2004).
16. Гречин С.Г., Гречин С.С., Дмитриев В.Г. *Квантовая электроника*, **30** (5), 377 (2000).