

УДК 535.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН ПРИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ В НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ

А.В. Шкаликков, В.В. Самарцев

Аннотация

Исследована эффективность генерации второй гармоники в условиях импульсной накачки фемтосекундной длительности (150 фс) нелинейных кристаллов, таких, как КТР, КДР, ДКДР, ВВО и LiIO_3 . Установлено, что наиболее перспективным оказался кристалл LiIO_3 , при синхронизме I типа эффективность преобразования во вторую гармонику составляет 25%. Проведен анализ спектров параметрического преобразования волн как в коллинеарном, так и в неколлинеарном режимах. Показано, что трехволновое взаимодействие наиболее эффективно при неколлинеарном оптическом параметрическом усилении, что напрямую связано с совпадением групповых скоростей волн, участвующих в процессе.

Ключевые слова: генерация второй гармоники, оптическое параметрическое усиление.

Введение

Среди большого количества проблем прикладной нелинейной оптики можно выделить задачи по преобразованию несущей частоты световой волны, то есть генерации оптических гармоник и параметрического преобразования частоты вниз. Решение задач такого рода в первую очередь связано с практической точки зрения с необходимостью создания перестраиваемых лазеров. Для этих целей широко используется метод оптического параметрического усиления. Для накопления заметных нелинейных эффектов трехволновых взаимодействий необходимо выполнение условий фазового синхронизма, физический смысл которого состоит в пространственном «резонансе» взаимодействующих световых волн. Выполнение условия синхронизма возможно только в анизотропных кристаллах для волн, характеризующихся различной поляризацией. Необходимым и достаточным условием для возникновения эффективного трехволнового взаимодействия в случае непрерывной накачки является одновременное выполнение следующих требований к кристаллу: оптическая прозрачность кристалла для всех взаимодействующих волн, выполнение фазового синхронизма, а также наличие ненулевой квадратичной нелинейности. В условиях импульсной накачки можно выделить два режима: стационарный и нестационарный [1]. Если длительность импульса основного излучения сравнима (или меньше) либо со временем групповой задержки взаимодействующих волн, либо с характерным временем дисперсионного расплывания, то такой режим трехчастотного взаимодействия называется нестационарным. В некоторых случаях работа в нестационарном режиме позволяет значительно повысить эффективность параметрического усиления и генерировать фемтосекундные импульсы длительностью менее 8 фс [2]. Поэтому целью настоящей работы является экспериментальное

исследование эффективности параметрических преобразований в одноосных нелинейных кристаллах в условиях фемтосекундной накачки прежде всего на основе анализа оптических спектров.

1. Методы и объекты

Генерация второй гармоники (ГВГ) происходит в среде с квадратичной нелинейностью диэлектрической поляризации [1, 3]. Необходимым условием эффективной ГВГ является наличие фазового синхронизма ($\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3$, где $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$ – волновые вектора волн накачки и второй гармоники) волн несущей частоты и второй гармоники. Указанный синхронизм обеспечивает накопление эффекта по всей длине нелинейного кристалла. В условиях накачки фемтосекундными импульсами (в нашем случае 150 фс) в нелинейной среде происходит групповое запаздывание импульсов [1]. Результатом такого запаздывания является уширение импульса второй гармоники или значительное уменьшение его энергии. Для минимизации потерь по энергии необходимо выполнение условия группового синхронизма $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_3$, где $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_3$ – групповые скорости основного излучения и второй гармоники соответственно. Кроме того, при накачке лазерными импульсами фемтосекундной длительности начинает оказывать существенное влияние дисперсионное распывание импульсов, которое также приводит к уменьшению эффективности преобразования во вторую гармонику [5].

Используемый в работе экспериментальный подход основан на анализе интенсивностей и ширин спектров ГВГ нелинейных кристаллов (КТР, КДР, ДКДР, ВВО и LiIO_3). Применение такого подхода связано с тем, что с увеличением ширины спектра и интенсивности второй гармоники увеличивается корреляция групповых скоростей накачки и второй гармоники. В эксперименте регистрировали спектры ГВГ, а в ходе их обработки получали значение ширины на полувьсоте (FWHM) как для второй гармоники (SH), так и для основной волны (pump). Кроме того, измерялась средняя мощность излучения второй гармоники. Исследования спектров ГВГ проводились с помощью фемтосекундного лазера FL-1 Yb:KYW – (Yb:KY(WO₄)₂) (с частотой повторения 80 МГц, с длительностью импульсов 150 фс, с центральной длиной волны 1040 нм, спектральной шириной 5 нм, энергией в импульсе 13 нДж и мощностью оптического излучения 0.85 Вт). Основные экспериментальные результаты приведены в табл. 1. Для дальнейшего исследования выбран кристалл йодата лития, в котором было максимальное совпадение групповых скоростей, а импульс не успевал сильно расплыться, а как следствие, коэффициент преобразования во вторую гармонику достигал 25% по мощности.

Для эффективной работы перестраиваемых лазеров важно получить высокий коэффициент преобразования волны накачки в сигнальную волну [4]. Как правило, наиболее эффективным считается коллинеарный режим, но он возможен только тогда, когда накачка непрерывна либо длительность импульсов лежит в пикосекундном диапазоне или больше. Это происходит потому, что длина взаимодействия волны накачки и параметрических волн намного больше для коллинеарных пучков, чем для неколлинеарных. Для ультракоротких импульсов накачки (фемтосекундный диапазон длительностей) возможно получить высокую эффективность как в коллинеарном, так и в неколлинеарном режиме. Эта возможность появляется из-за более точного совпадения фазовых и групповых синхронизмов и высокой интенсивности фемтосекундных импульсов. Таким образом, как и при ГВГ, энергообмен между волнами в оптическом параметрическом генераторе, накачиваемом ультракороткими импульсами, в значительной степени определяется расстройкой групповых скоростей волновых пакетов.

Табл. 1

Измеренные значения ширины на полувысоте и средняя мощность второй гармоники в разных кристаллах

№	Кристалл	FWHM ршпр, нм	FWHM SH, нм	Опт. мощность мВт
1	BBO (бета-борат бария) 3 мм	8	3.15	1.8
2	BBO 0.5 мм	8	3.2	–
3	DKDP (дигидрофосфат калия) 40 мм	8	4.2	8.8
4	KDP (гидрофосфат калия) 58 м	8	4.1	0.85
5	КТР (титанил фосфат калия) 3 мм	8	2.3	< 1
6	LiIO ₃ (йодат лития) 20 мм	8	3.7	164

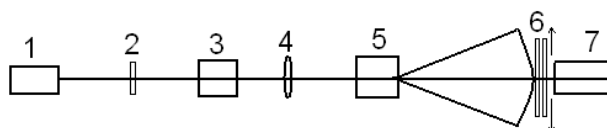


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – Yb:KYW-лазер; 2 – полуволновая пластинка; 3 – кристалл генерации второй гармоники; 4 – фокусирующая линза $f = 15$ см; 5 – кристалл для оптического параметрического усиления; 6 – набор светофильтров; 7 – оптический измеритель мощности и спектрометр (диапазон измерения спектра 160–1125 нм, Avesta)

Состав любой установки для исследования параметрического усиления в нелинейных средах схематично всегда можно представить в виде трех блоков: 1 – блок приготовления накачивающего излучения; 2 – блок приготовления затравочных импульсов; 3 – собственно нелинейная среда с системой регистрации. В нашем случае для упрощения экспериментальной схемы первый и второй блоки были совмещены. Исследовался параметрический процесс, обратный процессу генерации второй гармоники. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Инфракрасное излучение фемтосекундного Yb:KYW-лазера на длине волны 1.04 мкм, проходя через полуволновую пластину, накачивало квадратично-нелинейный кристалл LiIO₃ толщиной 20 мм, в котором происходила генерация второй гармоники. Для оптического параметрического усиления использовали такой же кристалл йодата лития, после выхода из которого излучение направлялось в спектрометр. Во избежание засветки спектрометра мощными фемтосекундными импульсами, а также для обеспечения оптимального режима его работы использовался набор светофильтров (СЗС-23 3 мм, СЗС-22 3 мм).

2. Результаты и их обсуждение

Процесс оптического параметрического усиления (ОПУ) состоит в перекачке энергии волны накачки в сигнальную волну, задаваемую слабым импульсом [5]. Для того чтобы сигнальная и холостая волны оставались в видимом или ближнем ИК-диапазонах, нелинейный кристалл накачивают второй гармоникой фемтосекундного лазера. Однако в этом случае длительность усиливаемых импульсов значительно увеличивается. Это происходит из-за увеличения дисперсии на коротких длинах волн, и, как результат, имеет место большое несоответствие групповых скоростей взаимодействующих волн. Эту проблему можно решить за счет использования нескольких каскадов ОПУ или применения неколлинеарной геометрии. Основная концепция неколлинеарного синхронизма была детально исследована

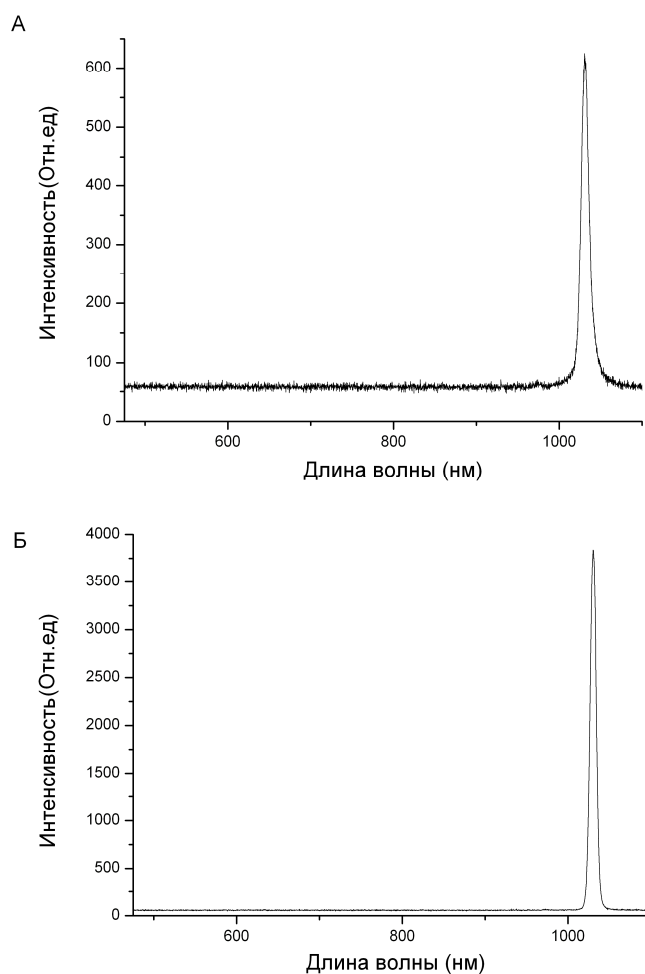


Рис. 2. А) спектр затравочного импульса (25 нм); Б) спектр усиленного импульса (10 нм)

в [5], и было показано, что в этом режиме можно достичь синхронизма групповых скоростей. Для усиления коротких импульсов важно, чтобы усиление происходило по всему его широкому спектру, а этого можно достичь с помощью параметрического усилителя, имеющего широкую полосу усиления, достигающую 160 ТГц.

Для создания затравочного импульса была использована часть излучения накачки, то есть вместе со второй гармоникой на длине волны 520 нм пропускалась малая часть излучения на длине волны 1040 нм. Исследован вырожденный коллинеарный и неколлинеарный режимы ОПУ, причем угол поворота спектрометра составлял 15° . На рис. 2, А представлен спектр затравочного импульса с шириной, равной 25 нм. В неколлинеарном режиме после усиления в ОПУ интенсивность на длине волны затравочного импульса значительно увеличилась (в 6.5 раз), а ширина спектра уменьшилась до 10 нм (см. рис. 2, Б). Такое уменьшение ширины спектра свидетельствует о недостаточном совпадении групповых скоростей сигнальной и накачивающей волн.

В процессе исследования ОПУ в коллинеарном режиме был получен спектр, приведенный на рис. 3, из которого видно, что эффективность усиления в коллинеарном режиме значительно меньше, чем в неколлинеарной схеме. Кроме того,

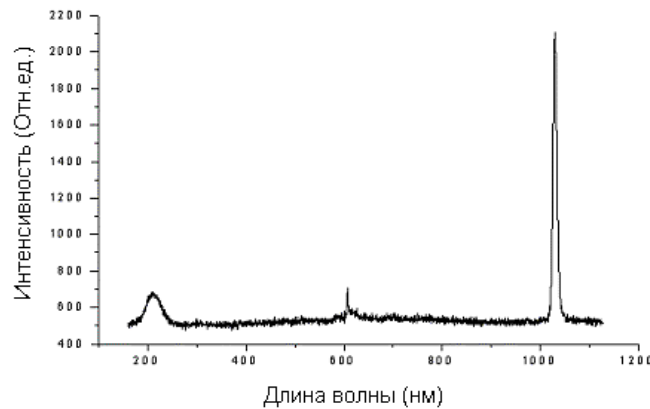


Рис. 3. Спектр излучения на выходе из ОПУ в условиях коллинеарного синхронизма

на рисунке видно два пика на 220 и 620 нм. Следует отметить, что первый пик не исчезал при установке КС-светофильтра, поглощающего ультрафиолетовое излучение. Это свидетельствует о том, что данный пик соответствует участку инфракрасного излучения, который формирует блик на ССD-линейке спектрометра из-за несовершенства его конструкции, и с нашей точки зрения является сопряженным (через закон сохранения энергии $\omega_{\text{pump}} = \omega_1 + \omega_2$) длине волны 620 нм, то есть соответствует линии волны 3.2 мкм. Появление пика на 3.2 мкм, на наш взгляд, обязано люминесценции накачки на светофильтрах после процесса ГВГ.

Заключение

Таким образом, в кристалле йодата лития (LiIO_3) получена наибольшая эффективность преобразования во вторую гармонику – 25%. Эффективность параметрического усиления остаточного излучения накачки в неколлинеарном режиме в 2 раза больше, чем в коллинеарном случае, что означает более точное совпадение групповых скоростей накачки и второй гармоники. Коэффициент усиления в неколлинеарном режиме достигает 6.5. В коллинеарном режиме, кроме вырожденного усиления, наблюдается невырожденное усиление второй гармоникой длины волны 3.2 мкм с появлением в спектре пика на длине волны 620 нм.

Мы благодарим В.Н. Крылова за постановку темы и В.Г. Беспалова за всемерную поддержку.

Исследования поддержаны Программой Президиума РАН «Квантовая макрофизика», Программами ОФН РАН «Оптическая спектроскопия и стандарты частоты» и «Когерентные акустические поля и сигналы», а также РФФИ (проекты № 08-02-00032-а, 10-02-00173-а) и № НК-346П.

Summary

A. V. Shkalikov, V. V. Samartsev. Investigation of Parametric Wave Interaction Processes under the Conversion of Radiation of Femtosecond Duration in Nonlinear Crystals.

The efficiency of the second harmonic generation under conditions of a pulse pumping of femtosecond duration (150 fs) in nonlinear crystals, such as KTP, KDP, DKDP, BBO and LiIO_3 , is investigated. The LiIO_3 crystal is found to be the most promising, in the case of type I synchronism the efficiency of conversion to the second harmonic is 25%. The spectra

of parametric wave transformation both in collinear and noncollinear modes are analyzed. It is shown that the three-wave interaction is the most effective in the case of noncollinear optical parametric amplification, which is directly due to the coincidence of the group velocities of the waves participating in the process.

Key words: second harmonic generation, optical parametric amplification.

Литература

1. *Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В.* Прикладная нелинейная оптика. – М.: Физматлит, 2004. – 512 с.
2. *Riedle E., Beutler M., Lochbrunner S., Piel J. et al* Generation of 10 to 50 fs pulses tunable through all of the visible and the NIR // *Appl. Phys.* – 2000. – V. 71. – P. 457–465.
3. *Цернике Ф., Мидвинтер Дж.* Прикладная нелинейная оптика. – М.: Мир, 1976. – 262 с.
4. *Козлов С.А., Самарцев В.В.* Оптика фемтосекундных лазеров. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 218 с.
5. *Krylov V. et al* Efficient noncollinear parametric amplification of weak femtosecond pulses in the visible and near-infrared spectral range // *Optics Lett.* – 1998. – V. 23, No 2. – P. 100–102.

Поступила в редакцию
17.01.10

Шкаликов Андрей Викторович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: *andrei_vs@rambler.ru*

Самарцев Виталий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: *samartsev@kfti.knc.ru*