

# Генерация мощных фемтосекундных суперконтинуумов в ближней ИК области спектра с использованием широкополосного параметрического преобразования частоты в кристаллах LBO и DCDA с накачкой излучением с $\lambda = 620$ нм

А.А.Подшивалов, Ф.В.Потемкин, Д.А.Сидоров-Бирюков

*Длина волны накачки параметрических усилителей на кристаллах CLBO, DCDA и LBO второй гармоникой фемтосекундного хром-форстеритового лазера (620 нм) близка к оптимальной для широкополосного усиления, что обусловлено близостью групповых скоростей взаимодействующих импульсов. При инжекции широкополосного континуума в область усиления сигнальной волны в параметрических усилителях на кристаллах LBO и DCDA с накачкой излучением с  $\lambda = 620$  нм получена генерация широкополосных фемтосекундных импульсов со спектром от 1050 до 1600 нм и с импульсной мощностью до 20 МВт.*

**Ключевые слова:** параметрическая генерация света, сверхкороткие лазерные импульсы, нелинейная оптика.

## 1. Введение

Генерация сверхширокополосных фемтосекундных импульсов, а также развитая за последние годы техника генерации оптического суперконтинуума в нелинейных световодах позволяют получать излучение в спектральной области шириной в несколько октав – от УФ до ближнего ИК [1, 2]. Однако мощность таких источников мала, спектральное распределение мощности излучения очень неоднородно и основная доля энергии суперконтинуума из-за нелинейности процесса генерации обычно сдвинута в синюю область спектра относительно длины волны возбуждающего импульса. Вместе с тем получение мощного широкополосного излучения в ИК области спектра (особенно с шириной спектра в октаву и больше) весьма актуально для решения задач метрологии, усиления предельно коротких импульсов и в перспективе – для генерации одиночных аттосекундных импульсов [3–5].

Наиболее эффективным методом, позволяющим реализовать усиление в ИК области спектра с шириной полосы в октаву, является трехчастотное параметрическое взаимодействие в кристаллах с квадратичной оптической нелинейностью, или оптическое параметрическое усиление (ОПУ) [6, 7]. Если на вход в параметрический усилитель в качестве инжектируемой волны подается широкополосное излучение оптического суперконтинуума с мощностью, превышающей мощность спонтанных шумов, то из этого затравочного спектра усилится только та его часть, которая попадает в полосу спектрального синхро-

низма взаимодействующих импульсов; в некоторых случаях может реализоваться и широкополосный режим параметрического усиления. Происходит это тогда, когда групповые скорости импульсов накачки, сигнальной и холостой волн близки либо когда разности групповых скоростей сигнального и холостого импульсов имеют разные знаки с групповой скоростью импульса накачки [8, 9].

К сожалению, длины волн традиционных источников накачки фемтосекундных усилителей – титан-сапфирового, неодимового и иттербиевого лазеров и их гармоник – не позволяют реализовать такой широкополосный режим коллинеарного ОПУ в большинстве эффективных нелинейно-оптических кристаллов. Исключение составляет лишь кристалл  $\text{BiVO}_4$  с накачкой излучением титан-сапфирового лазера на длине волны 780 нм [10, 11].

Реализовать групповой синхронизм взаимодействующих импульсов в ОПУ с накачкой «стандартным» фемтосекундным лазером можно искусственным образом, применив неколлинеарную схему взаимодействующих волн, на основе которой достигнуты выдающиеся результаты, позволившие обеспечить генерацию рекордно коротких световых импульсов в видимой области спектра [12, 13]. Увеличить ширину полосы усиления коллинеарного ОПУ в области длин волн, близкой к вырожденному режиму, можно также при использовании наклонных фронтов взаимодействующих волн [14], углового ахроматизма усиливаемого пучка [15] и широкополосной chirпированной накачки [16].

Вместе с тем коллинеарная схема ОПУ более предпочтительна с практической точки зрения, особенно в случае маломощных остросфокусированных пучков. Увеличить полосу усиления в ОПУ коллинеарной геометрии можно путем оптимизации длины волны накачки [17, 18]. Изменяя длину волны накачки для определенного нелинейно-оптического кристалла, можно подобрать такую спектральную область, в которой, в силу специфики изменения показателя преломления кристалла с длиной волны, разность групповых скоростей всех взаимодействующих импульсов будет минимальной, а следовательно, полоса усиления будет максимальной [17] даже в коллинеарной

А.А.Подшивалов, Д.А.Сидоров-Бирюков. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы, 1; e-mail: mishalisa@mail.ru, sidorov@phys.msu.ru

Ф.В.Потемкин. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы, 1; e-mail: potemkin@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 6 марта 2014 г.

геометрии. Отметим, что сверхширокие полосы параметрической люминесценции при возбуждении импульсом основного излучения и второй гармоники пикосекундного неодимового лазера наблюдались еще в конце 1970-х – начале 1980-х годов в кристаллах KDP и в ниобате лития [19–22], однако все возможности сверхширокополосного ОПУ как источника стабильного оптического суперконтинуума ультракороткой длительности смогли реализоваться в полной мере только с появлением высокостабильных источников фемтосекундных импульсов.

Расчеты спектральной ширины синхронизма параметрического усилителя, опубликованные в [3, 10, 18], а также проведенные нами расчеты показывают, что в целом ряде нелинейно-оптических кристаллов можно реализовать очень широкие полосы усиления (вплоть до октавы) в ближней ИК области спектра, используя коллинеарную схему ОПУ и оптимизируя только длину волны источника накачки.

В табл.1 приведены оптимальные длины волн накачки, при которых реализуется режим сверхширокополосного параметрического усиления в ближней ИК области спектра в ряде нелинейно-оптических кристаллов. Данные взяты из работ [10, 18] и дополнены собственными расчетами.

Как видно из табл.1, для параметрических усилителей на кристаллах DCDA и CLBO, а также частично и для LBO, длина волны второй гармоники фемтосекундного хром-форстеритового лазера (620–630 нм) близка к оптимальной длине волны накачки.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование режима сверхширокополосного параметрического усиления в вышеуказанных кристаллах при

инъекции суперконтинуума в область перестройки сигнальной волны и при накачке параметрического усилителя излучением второй гармоники фемтосекундного хром-форстеритового лазера (620 нм).

## 2. Расчет оптического параметрического усиления в кристаллах DCDA, LBO, CLBO при накачке излучением с $\lambda = 620$ нм

В табл.2 приведены расчетные параметры широкополосных усилителей при накачке излучением с  $\lambda = 620$  нм, а на рис.1 – соответствующие контуры спектральной ширины полосы усиления.

Контуры спектральной ширины полосы усиления ОПУ строились по точкам. Для каждой длины волны рассчитывалась спектральная ширина синхронизма, исходя из разности групповых скоростей сигнального и холостого импульсов по методике, описанной в [23]; при этом диапазон изменения длин взаимодействующих волн ограничивался только условиями углового синхронизма взаимодействия при заданной толщине кристалла ОПУ в заданном направлении волнового вектора. Инкремент усиления (см. табл.2) вычислялся при интенсивности накачки  $I_{\max}$ , близкой к порогу пробоя для каждого кристалла.

Результаты расчетов показывают, что ширина полосы параметрического усиления на всех кристаллах при данной длине волны накачки позволяет эффективно усиливать световой импульс с длительностью, соответствующей двум периодам световых колебаний в центре полосы усиления (1240 нм).

Табл.1. Кристаллы, в которых возможно сверхширокополосное параметрическое усиление в ближней ИК области спектра при оптимальной длине волны накачки.

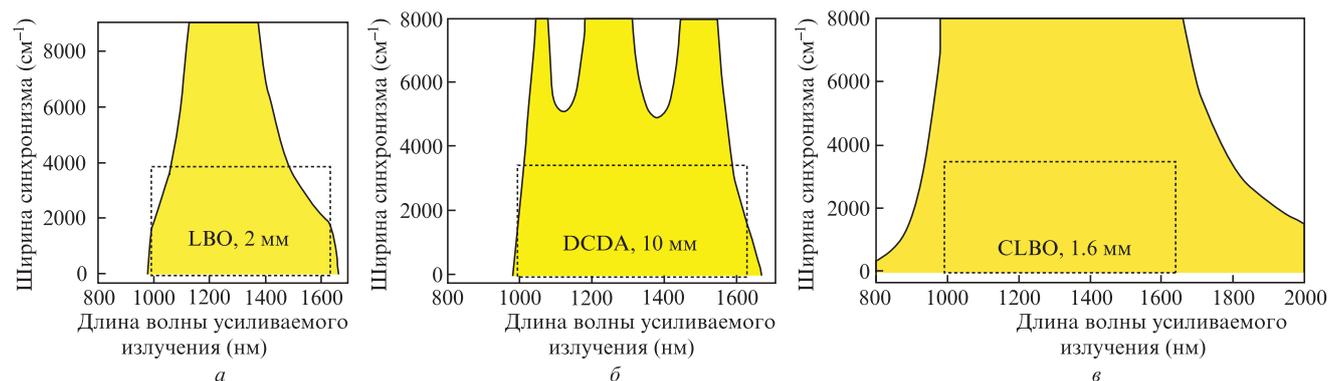
Кристалл	Оптимальная длина волны накачки (нм)	Спектральная область усиления (нм)*	$\Delta\lambda/\lambda$ (%)	$D_{\text{eff}}$ (пм/В)	Углы синхронизма $\theta; \varphi$ (град)	Возможный источник накачки	Литература
KDP	475	780–1250	47	0.27	41.3; 45	ПГС, ВГ Nd:YAG на 946 нм	
DKDP	560	920–1430	45	0.2	36.0; 45	ПГС, Краситель	
CDA	570	950–1420	40	0.39	80.1; 45	ПГС, Краситель	
DCDA	630	1000–1610	43	0.35	70.5; 45	ВГ Cr:форстерит	
BBO	700–720	950–2240	90	2.0	20.0; 90	Ti:сапфир, Рубин	
	716	1121–1982	56				[10]
	665	982–2060	71		20.7	ВГ Nd:YAG	[18]
LBO	585	920–1560	49	0.8	90; 1.4	ПГС, Краситель	
	599	944–1625	53				[10]
	585	872–1780			90; 4.5		[18]
CLBO	600–620	910–1740	70	0.33	28; 45	ВГ Cr:форстерит	
	629	995–1710	56				[10]
BiVO	800	1200–2100	67			Ti:сапфир	
LiIO <sub>3</sub>	920	1250–3200	90	1.2	19.5	ПГС, Nd:YAG на 946 нм	
	970	1609–2940	58				[10]
	970	1410–3100			19.2		[18]
LiNbO <sub>3</sub>	900	1310–2820	72	4	45	ПГС, Ti:сапфир	
	949	1690–2166	25				[10]

\* Для кристалла оптимальной толщины. ПГС – параметрический генератор света; ВГ – вторая гармоника.

Табл.2. Расчетные параметры параметрических усилителей с накачкой излучением второй гармоники лазера на хром-форстерите (длина волны 620 нм).

Кристалл	Толщина кристалла (мм)	Порог пробоя (ГВт/см <sup>2</sup> )*	$D_{\text{эф}}$ (пм/В)	Инкремент усиления на проход при $I = I_{\text{max}}$	Диапазон усиления (нм)	Полоса усиления (см <sup>-1</sup> )	Предельная длительность усиливаемого импульса (в периодах колебаний)
DCDA	10	0.3	0.37	7.5	1015–1600	3700	2.0
LBO	2	4	0.83	11.2	1040–1550	3000	2.5
CLBO	2	2.5	0.36	4.3	960–1750	4500	1.6

\* Для импульса длительностью 10 нс.

Рис.1. Расчетные контуры спектральной ширины параметрического усиления кристаллов LBO, DCDA и CLBO разной толщины при накачке излучением с длиной волны 620 нм. Пунктирной линией на каждом рисунке указан масштаб спектра импульса, длительность которого равна двум периодам световых колебаний на центральной длине волны 1240 нм (по уровню 3600 см<sup>-1</sup>).

Уменьшение толщины кристалла DCDA не позволяет получить еще большую ширину полосы усиления, т.к. вследствие сильного поглощения остаточных OD радикалов полоса прозрачности этого воднорастворимого кристалла не превышает с длинноволновой стороны спектра 1.45–1.65 мкм. Это принципиально ограничивает полосу усиления ОПУ на кристалле DCDA и делает потенциально невозможным усиление импульса короче двух световых периодов даже при оптимальной длине волны накачки и очень малой толщине кристалла.

### 3. Широкополосное усиление и генерация фемтосекундного излучения при накачке параметрических усилителей импульсом хром-форстеритового лазера с $\lambda = 620$ нм

Экспериментальная установка для изучения генерации сверхширокополосных импульсов, схема которой приведена на рис.2, представляет собой однопроходный параметрический усилитель бегущей волны с импульсной на-

качкой и широкополосной инжекцией в область перестройки сигнальной волны. Инжектируемым излучением служит импульс суперконтинуума, генерируемый в пластинке из сапфира частью импульса (3 мкДж) основного излучения лазера на хром-форстерите (1240 нм, 110 фс). Спектр суперконтинуума имел максимум на 1240 нм и простирался от 430 до 1500 нм. С помощью дихроичного зеркала и цветных фильтров СС4 и ФС6 из этого спектра вырезалась область 750–1150 нм, при этом удавалось добиться относительно равномерного распределения энергии континуума по спектру. Затем инжектируемый пучок с помощью дихроичного зеркала совмещался коллинеарно с пучком накачки на 620 нм и направлялся в кристалл ОПУ. Интенсивность накачки составляла 50–120 ГВт/см<sup>2</sup>, наблюдение спектров усиленного излучения в коротковолновой области в процессе настройки и юстировки ОПУ осуществлялось за одну вспышку спектрометром с InGaAs-линейкой (модель SDH-IV, Solar LS, спектральное разрешение 4 нм, область чувствительности 900–1675 нм). Окончательно спектр генерируемого сверхширокополосного импульса измерялся либо при усреднении по 50 ре-

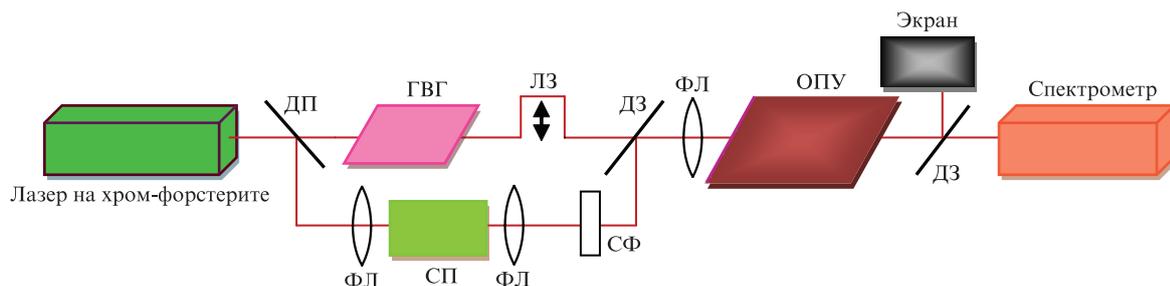


Рис.2. Схема экспериментальной установки:

ДП – делитель пучка; ЛЗ – линия задержки; ДЗ – дихроичное зеркало; СП – сапфировая пластинка; ФЛ – фокусирующие линзы; СФ – светофильтр; ГВГ – генератор второй гармоники.

лизациям, либо по точкам с помощью сканирующего монохроматора с PbS-детектором (спектральное разрешение 6 нм, область чувствительности 800–2750 нм).

### 3.1. Широкополосное параметрическое усиление в кристалле LBO(I) с накачкой излучением с $\lambda = 620$ нм

В экспериментах использовались кристаллы LBO первого типа (о-е-взаимодействие) с размерами  $5 \times 5 \times 5$  и  $5 \times 5 \times 4$  мм, вырезанные вдоль оси  $X$  ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0$ ), без просветляющего покрытия. Кристалл ОПУ слегка поворачивался в плоскости  $XZ$  в диапазоне углов  $\theta = 86^\circ - 90^\circ$  и в плоскости  $XY$  в диапазоне углов  $0 - 3^\circ$  для получения максимально широких спектров усиливаемого излучения. Кристаллы помещались в перетяжку пучка, фокусируемого линзой с фокусным расстоянием  $f = 150$  см. При настройке на точный синхронизм и в отсутствие пробного сигнала имело место усиленное излучение суперфлуоресценции из обоих кристаллов, затем энергия накачки уменьшалась до порога возникновения флуоресценции, открывался пучок пробного сигнала и проводились измерения спектров усиленного континуума. Типичный спектр фемтосекундного континуума на выходе ОПУ, измеренный за одну лазерную вспышку, приведен на рис.3. Ширина спектра составляла 200–350 нм, что хорошо коррелирует с результатами расчетов для кристалла толщиной 5 мм.

На рис.4,б приведен спектральный контур усиления в сигнальной ветви ОПУ на кристалле LBO толщиной 5 мм. Коэффициент усиления на каждой длине волны в области 900–1220 нм измерялся как отношение двух амплитуд сигналов с фотоприемника при наличии и в отсутствие накачки ОПУ. При такой ширине полосы усиления в сигнальной волне ширина полосы усиления в холостой волне будет составлять 30% от ширины несущей, т.е. даже такой длинный кристалл позволит усиливать импульсы длительностью до трех световых периодов на длине волны 1.4 мкм.

При внесении с помощью линии задержки небольшого рассогласования в моменты прихода импульсов накачки и континуума на вход в кристалл усилителя в спектрах усиленного излучения возрастала интенсивность коротковолновой части. Можно было найти такое положение

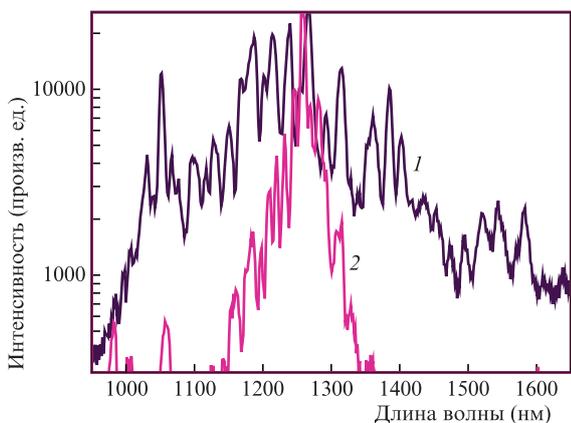


Рис.3. Спектр выходного излучения ОПУ на кристалле LBO(I) толщиной 4 мм за одну лазерную вспышку (1) (усиление в сигнальной ветви усилителя составляет 80–150, диапазон чувствительности InGaAs-спектрометра с волоконным входом равен 900–1675 нм), а также спектр суперфлуоресценции этого же кристалла при большей энергии накачки и в отсутствие усиливаемого импульса (2).

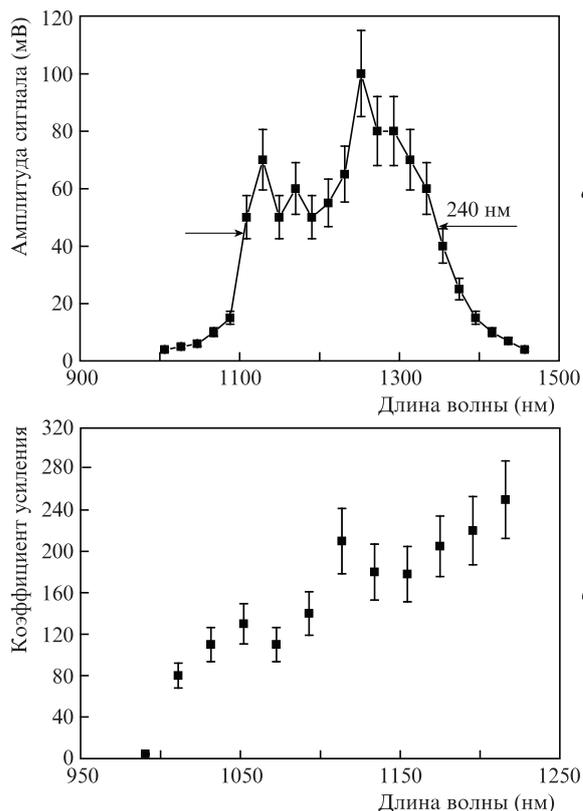


Рис.4. Усредненный спектр излучения на выходе параметрического усилителя на кристалле LBO толщиной 5 мм ( $\theta = 88^\circ$ ,  $\varphi = 0$ ) с инжекцией суперконтинуума в область сигнальной волны (а) и спектральный профиль коэффициента усиления того же кристалла в области сигнальной волны (б). Накачка излучением на 620 нм, усиление в максимуме 250. Спектр измерялся сканирующим монохроматором с PbS-детектором, усреднение осуществлялось по 20 импульсам в каждой точке.

линии задержки, при котором почти весь спектр усиленного импульса сосредотачивался в диапазоне 950–1350 нм.

При энергии импульса накачки 60 мкДж (интенсивность накачки в кристалле около  $120$  ГВт/см<sup>2</sup>) эффективность преобразования ОПУ составляла 6%–4%, а длительность импульсов континуума, измеренная на длине волны 1.32 мкм автокорреляционным методом, была равна  $115 \pm 5$  фс; таким образом, импульсная мощность континуума достигала 20 МВт (спектральная плотность энергии в нем составляла 5–7 нДж/нм).

Заметим также, что длина волны накачки 620 нм, используемая в данных экспериментах, была близка к оптимальной, но все же не являлась таковой для ОПУ на кристалле LBO (расчетная длина волны составляет 585 нм).

### 3.2. Широкополосное параметрическое усиление в кристалле DCDA(I) с накачкой излучением с $\lambda = 620$ нм

В экспериментах были использованы кристаллы DCDA с 90%-ной степенью дейтерирования толщиной 8 и 15 мм, вырезанные под углом  $74^\circ$  к оптической оси (е-оо-взаимодействие). Излучение накачки (620 нм) фокусировалось в кристаллы линзой с фокусным расстоянием  $f = 20$  см, плотность мощности накачки поддерживалась немного ниже порога возникновения континуума и начала его излучения из объема кристалла (это контролировалось поворотом кристалла на  $90^\circ$  в положение о-е-е, в котором синхронизм ОПУ отсутствует). Размер перетяжки проб-

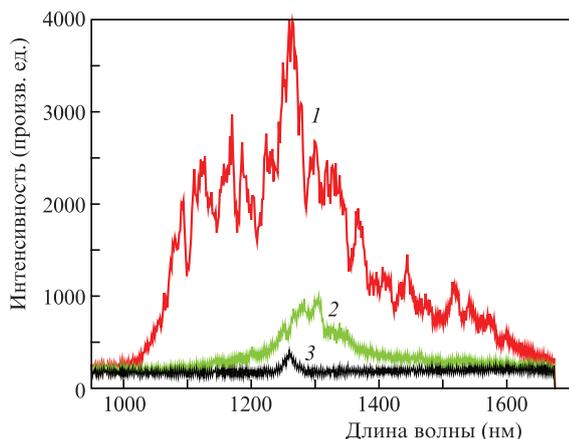


Рис.5. Спектр излучения на выходе усилителя на кристалле DCDA ( $\theta = 71^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ , толщина 8 мм) с накачкой излучением второй гармоники хром-форстеритового лазера (620 нм), зарегистрированный InGaAs-спектрометром (1), спектр излучения параметрической суперфлуоресценции (пробный луч закрыт) (2) и спектр пробного излучения в масштабе 10:1 (3). Хотя спектральное распределение пробного излучения выравнилось с помощью дихроичного зеркала и цветных фильтров, остался пичок на 1260 нм, заметный и в усиленном спектре.

ного широкополосного сигнала примерно в два раза превышал размер перетяжки пучка накачки. В таких условиях коэффициент усиления пробного сигнала в сигнальной ветви усиления составил 100–200 при одновременной генерации широкополосного излучения на холостой длине волны. Типичный спектр излучения параметрического усилителя, зарегистрированный InGaAs-спектрометром в одном лазерном выстреле, приведен на рис.5.

Спектральная ширина, амплитуда и форма широкополосных спектров сильно зависели от угла поворота кристалла относительно угла фазового синхронизма (в диапазоне  $\pm 1.5^\circ$ ) и от задержки между импульсом накачки и входным пробным импульсом суперконтинуума, имевшим небольшой положительный чирп несущей частоты. На рис.6 представлены два спектра выходного излучения усилителя на кристалле DCDA толщиной 15 мм при двух различных положениях оптической линии задержки ( $\pm 50$  фс). В первом случае (рис.6,а) импульс накачки лучше совпадал с коротковолновой частью импульса усиливаемого континуума, а во втором случае (рис.6,б) – с длинноволновой.

Эффективность преобразования излучения накачки в широкополосный импульс в ОПУ на кристалле DCDA была около 1%–2%, длительность параметрически усиленного импульса примерно соответствовала длительности импульса накачки (110 фс).

Таким образом, использование импульсов второй гармоники фемтосекундного хром-форстеритового лазера с длиной волны 620 нм в качестве излучения накачки параметрических усилителей на кристаллах DCDA и LBO позволило приблизиться к режиму группового синхронизма взаимодействующих импульсов в данных кристаллах и реализовать эффективное широкополосное усиление и генерацию фемтосекундных континуумов в ближней ИК области спектра с импульсной мощностью до 20 МВт и спектральной шириной до 450 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-01367а).

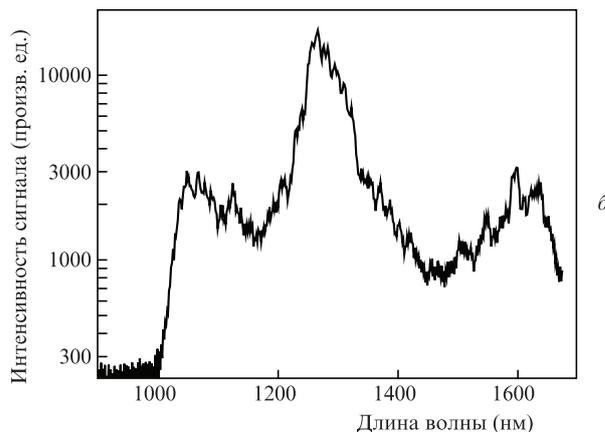
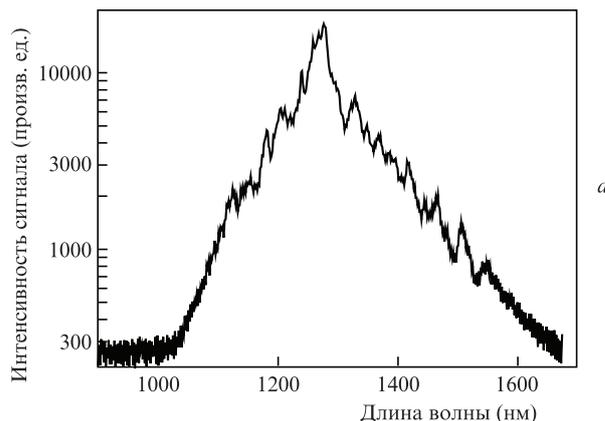


Рис.6. Широкополосные усиленные спектры в кристалле DCDA толщиной 15 мм при времени задержки импульса накачки по отношению к пробному импульсу +50 фс (а) и –50 фс (б).

1. Желтиков А.М. *Оптика микроструктурированных волокон* (М.: Наука, 2004).
2. Dudley J.M., Genty G., Coen S. *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 1135 (2006).
3. Brabec T., Krausz F. *Rev. Mod. Phys.*, **72**, 545 (2000).
4. Goulielmakis E. et al. *Science*, **320**, 1614 (2008).
5. Krausz F., Ivanov M. *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 164 (2009).
6. Piskarskas A.P., Stabinis A.P., Pyragaite V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **46**, 1031 (2010).
7. Cerullo G., De Silvestri S. *Rev. Sci. Instrum.*, **74**, 1 (2003).
8. Сухоруков А.П., Щеднова А.К. *ЖЭТФ*, **60**, 1251 (1971).
9. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. *Оптика фемтосекундных лазерных импульсов* (М.: Наука, 1988).
10. Gaydardzhiev A. et al. *Opt. Express*, **16**, 2363 (2008).
11. Ghotbi M. et al. *Opt. Express*, **14**, 10621 (2006).
12. Wilhelm T., Piel J., Riedle E. *Opt. Lett.*, **22**, 1494 (1997).
13. Baltuška A., Fuji T., Kobayashi T. *Opt. Lett.*, **27**, 306 (2002).
14. Shirakawa A. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2268 (1999).
15. Arisholm G. et al. *Opt. Express*, **12**, 518 (2004).
16. Limpert J. et al. *Opt. Express*, **13**, 7386 (2005).
17. Лукашев А.А., Магницкий С.А., Прялкин В.И. *Изв. РАН. Сер. Физич.*, **59** (12), 123 (1995).
18. Орлов С.Н., Пестряков Е.В., Поливанов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **34** (5), 477 (2004).
19. Campillo A.J., Nyer R.C., Shapiro S. *Opt. Lett.*, **4**, 357 (1979).
20. Барейка Б., Бирмонтас А., Дикчос Г., Пискарскас А., Сируткайтис В., Стабинис А. *Квантовая электроника*, **9** (12), 2534 (1982).
21. Бирмонтас А., Пискарскас А., Стабинис А. *Квантовая электроника*, **10** (9), 1881 (1983).
22. Муравьев А.А., Рубинов А.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **37**, 597 (1983).
23. Smith A. *Opt. Lett.*, **26**, 719 (2001); SNLO software from [www.as-photonics.com](http://www.as-photonics.com).