

Усиление пикосекундных импульсов в кристаллах $\text{LiF} : F_2^-$ при синхронной пико- и наносекундной лазерной накачке

Т.Т.Басиев, А.Я.Карасик, В.А.Конюшкин, В.В.Осико, А.Г.Папашвили, Д.С.Чунаев

Предложена и реализована схема усиления пикосекундных импульсов в кристаллах $\text{LiF} : F_2^-$ при последовательной синхронной пико- и наносекундной лазерной накачке излучением YLF:Nd-лазеров. В результате двухстадийного усиления цугов импульсов ВКР с $\lambda = 1150$ нм и длительностью 22 пс, излучаемых кристаллом PbMoO_4 , достигнуто коэффициент усиления по мощности $(2 - 4) \times 10^3$ и получены одиночные импульсы длительностью 6 пс с энергией 0.88 мДж.

Ключевые слова: кристаллы $\text{LiF} : F_2^-$, синхронная накачка, пико- и наносекундные импульсы.

Кристаллы LiF с центрами окраски имеют широкие ($\sim 2000 \text{ см}^{-1}$) полосы поглощения и люминесценции, что при больших поперечных сечениях излучательных переходов и высоком квантовом выходе делает перспективным их применение для генерации нано, пико- и фемтосекундных световых импульсов [1–4]. Ранее высокая эффективность использования кристаллов $\text{LiF} : F_2^-$ для усиления перестраиваемых в спектральной области 1090–1270 нм наносекундных импульсов была продемонстрирована в работах [5, 6]. Необходимо отметить, что по ряду спектральных и оптико-механических характеристик [1] кристаллы LiF с центрами окраски превосходят хорошо известные и применяемые для усиления пико- и фемтосекундных импульсов активные среды на основе красителей и активированных различными ионами стекол и кристаллов [7]. В настоящей работе мы впервые исследовали возможность усиления пикосекундных импульсов в кристаллах LiF с F_2^- -центрами окраски в условиях синхронной пико- и наносекундной лазерной накачки кристаллов.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве задающего лазера использовался лазер на кристалле $\text{YLiF}_4 : \text{Nd}^{3+}$ (YLF:Nd), работающий на основной ТЕМ₀₀-мод в режиме пассивной синхронизации мод с помощью насыщающегося поглотителя – твердого раствора красителя в полимерной пленке. Лазер излучал на $\lambda = 1047$ нм цуги импульсов длительностью ~ 100 нс с длительностью отдельного импульса ~ 22 пс (рис. 2, кривая 1).

Излучение лазера фокусировалось в нелинейный кристалл PbMoO_4 длиной 30 мм, в котором генерировался цуг ВКР-импульсов длительностью 20–22 пс на стоксовой длине волны 1150 нм [8]. За кристаллом PbMoO_4 находился кристалл $\text{LiF} : F_2^-$, накачиваемый прошедшими через ВКР-кристалл пикосекундными импульсами с

$\lambda = 1047$ нм. Максимум полосы усиления F_2^- -центров окраски близок к длине волны усиливаемого ВКР-излучения $\lambda = 1150$ нм. Фокусировка лазерного излучения через нелинейный ВКР-кристалл в усилитель 1 на кристалле $\text{LiF} : F_2^-$ позволяет реализовать синхронное усиление всего цуга пикосекундных ВКР-импульсов (рис. 2, кривая 2). Использование такого усилителя с синхронной пикосекундной накачкой дает возможность существенно улучшить пространственную направленность пучка ВКР-излучения, поскольку усиление развивается только в узком канале накачки усилителя на кристалле $\text{LiF} : F_2^-$.

В результате описанного синхронного усиления пикосекундных ВКР-импульсов мы получили ~ 10 -кратный рост энергии излучения всего ВКР-цуга (от 4.4 до 44 мкДж). Коэффициент усиления импульсов по энергии варьировался от вспышки к вспышке в пределах 8–12, что связано с характерной для ВКР, развивающегося из спонтанных шумов, амплитудной нестабильностью. Длительность ВКР-импульсов (19–22 пс) после такого усиления в кристалле $\text{LiF} : F_2^-$ уменьшалась до 7–8 пс при соответствующем увеличении их пиковой мощности.

Усиленные импульсы излучения с $\lambda = 1150$ нм и длительностью 7–8 пс фокусировались через дихроичное зеркало ДЗ3 и диафрагму в усилитель 2 на кристалле $\text{LiF} : F_2^-$ длиной 80 мм с торцами, скошенными под брестеровскими углами. Этот усилитель обеспечивал усиление пикосекундных ВКР-импульсов при наносекундной накачке, поскольку в него коллинеарно с ВКР-излучением направлялось отраженное от зеркала ДЗ2 мощное излучение накачки наносекундного YLF:Nd-лазера с $\lambda = 1047$ нм. Резонатор данного лазера был образован глухим сферическим зеркалом с радиусом кривизны $r = 3$ м и стопой резонансного отражателя из трех стеклянных пластин с коэффициентом отражения $R = 30\%$ и включал в себя в качестве пассивного модулятора добротности третий $\text{LiF} : F_2^-$ -кристалл. Для просветления этого затвора с целью синхронного старта нано- и пикосекундного лазеров в резонатор наносекундного лазера направлялся цуг пикосекундных импульсов, ответвленный из задающего лазера полупрозрачными дихроичными зеркалами ДЗ1 и ДЗ2. Меняя с помощью юстировки зеркала ДЗ2 энергию пикосекундного излучения с $\lambda = 1047$ нм,

Т.Т.Басиев, А.Я.Карасик, В.А.Конюшкин, В.В.Осико, А.Г.Папашвили, Д.С.Чунаев. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: karasik@lst.gpi.ru

Поступила в редакцию 20 декабря 2004 г., после доработки – 22 февраля 2005 г.

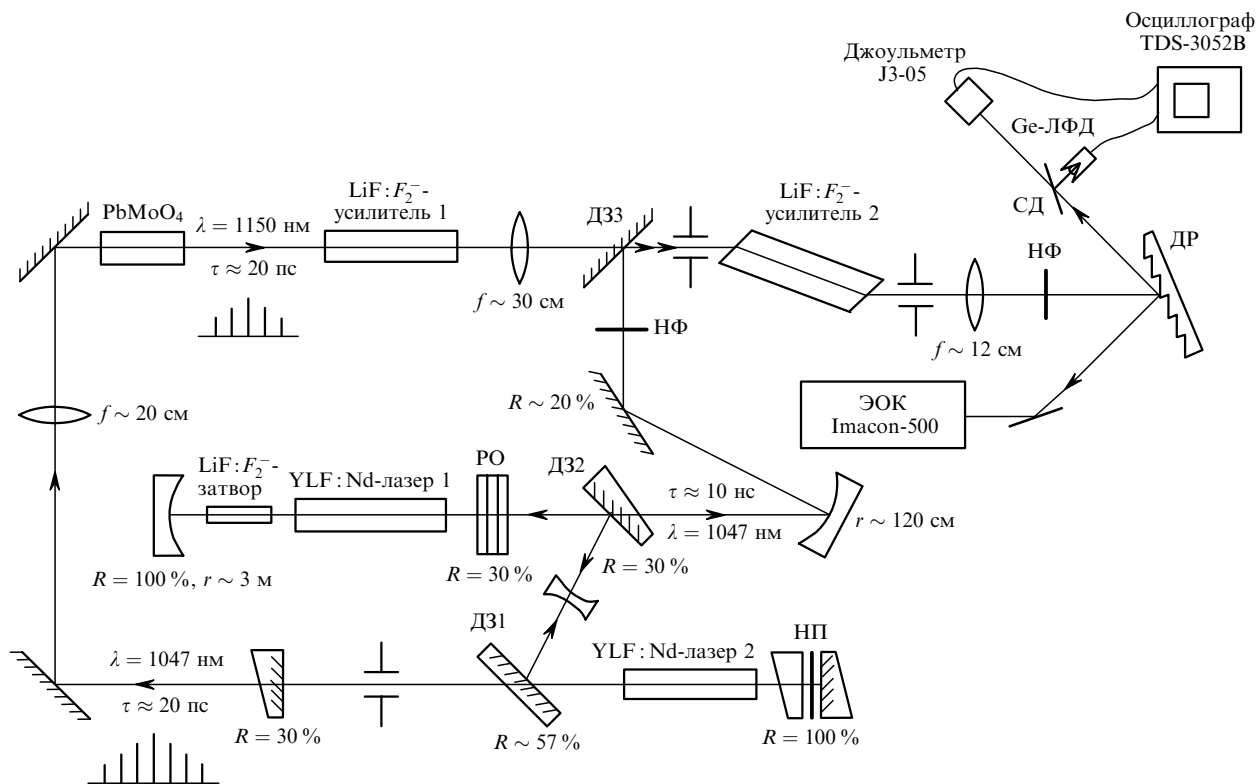


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

НП – насыщающийся поглотитель; Д31 и Д32 – дихроичные зеркала с коэффициентом отражения $R = 57\%$ и 30% соответственно; Д33 – дихроичное зеркало для вывода излучения из задающего лазера; РО – стопа резонансного отражателя с $R = 30\%$; ДР – дифракционная решетка; Ge-ЛФД – германиевый лавинный фотодиод; НФ – нейтральные фильтры; СД – светоделительная пластина.

направляемого в резонатор наносекундного YLF:Nd-лазера 2, и варьируя энергию ламповой накачки лазера, мы могли просветлять наносекундный LiF:F₂⁻-затвор синхронно с выбранным пикосекундным импульсом в пуце.

В результате YLF:Nd-лазер 2 излучал мощные импульсы длительностью 10 нс, синхронизованные с ВКР-импульсами длительностью 7–8 пс. В кристалл-усилителе 2 эти импульсы фокусировались с помощью поворотного сферического зеркала и плоского дихроичного зеркала Д33. После двух усилителей с пико- и наносекундной накачкой усиленное пикосекундное излучение направлялось на дифракционную решетку для его пространственного разделения с излучением накачки и далее

на пирозлектрический джоульметр, германиевый лавинный фотодиод и электронно-оптическую камеру Imacon-500 с временным разрешением 1.5 пс для измерения энергетических и временных параметров усиленного излучения.

На рис.3 представлена зависимость коэффициента усиления ВКР-излучения от энергии наносекундного излучения, накачивающего кристалл-усилитель 2. Видно, что при энергии накачки, близкой к 15 мДж, наблюдается выход кривой усиления на насыщение. Относительно большой статистический разброс коэффициентов усиления при слабой накачке связан с отсутствием точной временной привязки импульса накачки усилителя длитель-

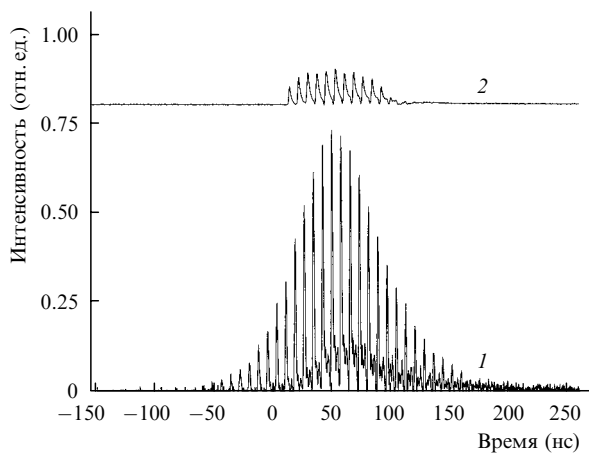


Рис.2. Осциллограммы излучения пикосекундного YLF:Nd-лазера накачки с $\lambda = 1047$ нм (1) и усиленного пуца пикосекундных ВКР-импульсов с $\lambda = 1150$ нм в кристалле-усилителе 1 (2).

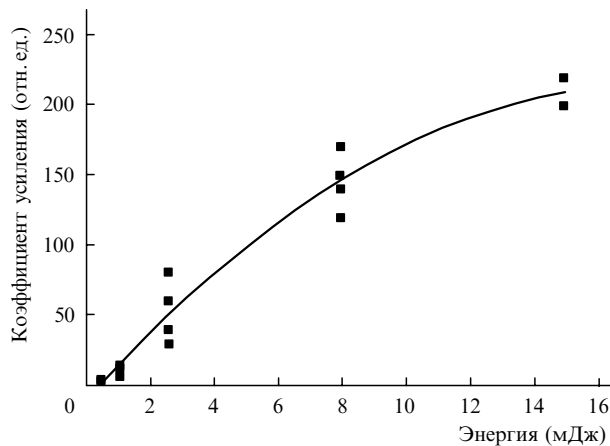


Рис.3. Зависимость коэффициента усиления ВКР-излучения от энергии импульсов наносекундного излучения, накачивающего кристалл-усилитель 2.

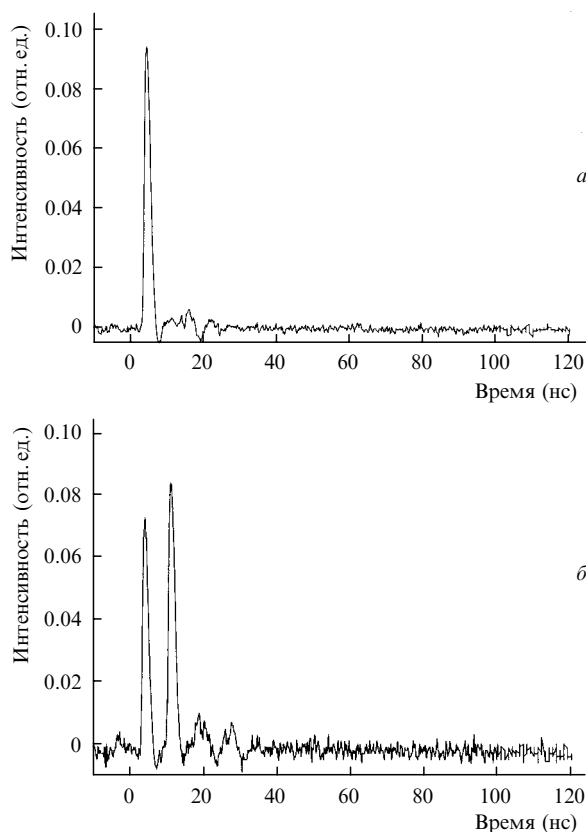


Рис.4. Осциллограммы пикосекундного излучения с $\lambda = 1150$ нм после наносекундного $\text{LiF} : F_2^-$ -усилителя 2 при усилении одного (а) и двух (б) импульсов.

ностью 10 нс к пугу пикосекундных импульсов ВКР-излучения (временной джиттер менее 8 нс).

Осциллограмма пикосекундного излучения с $\lambda = 1150$ нм после наносекундного кристалла-усилителя 2 приведена на рис.4. Из начального пуга ВКР-импульсов (рис.2, кривая 2) после наносекундного усилителя в усиленном излучении в зависимости от точности временной синхронизации пико- и наносекундного импульсов доминируют только один или два мощных усиленных импульса. В случае усиления преимущественно одного пикосекундного импульса энергия излучения, измеряемая одновременно с осциллограммой усиленного пуга импульсов, незначительно меньше энергии излучения двух мощных импульсов (рис.4,б).

В результате описанного двухкаскадного пико- и наносекундного усиления при энергии наносекундной накачки 15 мДж энергия пуга пикосекундных усиленных импульсов составила 0.88 мДж при длительности усиленного импульса ~ 6 пс, что соответствует пиковой мощности ~ 150 МВт. Следует отметить хорошую воспроизводимость длительности сжатых при усилении импульсов.

Энергия измерялась с помощью джоульметра. Коэффициент усиления пуга импульсов по энергии во втором каскаде (кристалл-усилитель 2) был равен 20. Общий коэффициент двухкаскадного усиления (по энергии) излучения с $\lambda = 1150$ нм достигал 200. Это значение получено делением энергии излучения на выходе второго усилителя на энергию полного пуга ВКР-импульсов излучения на входе первого усилителя и позволяет лишь оценить снизу энергию отдельных импульсов в пуге. Действи-

тельно, на входе наносекундного усилителя 2 пуг состоит из ~ 10 пикосекундных импульсов, разделенных аксиальным интервалом ~ 8 нс (рис.2, кривая 2), а выходной пуг – из одного-двух импульсов (рис.4). Таким образом, коэффициент усиления по энергии одного импульса должен быть увеличен в 4–10 раз и достигнет значения $(0.8 - 2) \times 10^3$.

Мы также могли независимо определить коэффициент синхронного усиления ВКР-излучения по энергии второго каскада усилителя непосредственно из осциллограмм, приведенных на рис.4, нормируя амплитуду выходного усиленного импульса на амплитуду предшествующих ему ВКР-импульсов, прошедших через каскад усиления до прихода импульса наносекундной накачки. Измеренный таким образом коэффициент усиления второго (с наносекундной накачкой) каскада варьируется для разных измерений от 55 до 80. Учитывая 8–12-кратное усиление в синхронном пикосекундном усилителе 1, имеем общий коэффициент усиления по энергии одиночного импульса $(0.5 - 1) \times 10^3$. Далее, учитывая примерно четырехкратное временное сжатие импульсов при усилении, получаем полный коэффициент усиления по мощности $\sim (2 - 4) \times 10^3$, что неплохо согласуется с описанными выше результатами измерений.

Замена нелинейного кристалла PbMoO_4 на KGdWO_4 с близким значением коэффициента ВКР-усиления [8] привела к изменению временных параметров усиления. В последнем кристалле изначально более короткие ВКР-импульсы имели длительность 8.5 пс, которая не менялась после первого и второго каскадов усиления. Некоторые причины различия в трансформации длительностей усиливаемых ВКР-импульсов от разных кристаллов обсуждались в [8] и нуждаются в специальном исследовании. Можно отметить, что в оксидных нелинейных кристаллах возможна генерация ВКР-импульсов длительностью ~ 1 пс [8].

В заключение отметим, что рассмотренный в настоящей работе источник пикосекундного излучения с энергией импульса ~ 1 мДж открывает хорошие перспективы для получения тераваттных импульсов при дальнейшем увеличении числа каскадов усиления на базе кристаллов $\text{LiF} : F_2^-$ с наносекундной лазерной накачкой.

Работа частично поддержана грантами МНТЦ (№ 2022Р) и РФФИ (№ 04-02-08163офи и 04-02-17004).

1. Basiev T.T., Zverev P.G., Mirov S.B. *Handbook of Laser Technology and Applications* (New York: Institute of Physics Publishing, 2003, B1.8, p. 1).
2. Бабушкин А.В., Басиев Т.Т., Воробьев Н.С., Мирон С.Б., Прохоров А.М., Сердюченко Ю.Н., Шелев М.Я. *Квантовая электроника*, **13**, 2262 (1986).
3. Басиев Т.Т., Карасик А.Я., Дергачев А.Ю., Федоров В.В., Шубочкин Р.Л. *Квантовая электроника*, **23**, 1072 (1996).
4. Zverev P.G., Basiev T.T., Laubereau A. *Novel Lasers and Applications Basic Aspects* (Washington, DC, OSA, 1999, p. 57).
5. Басиев Т.Т., Ермаков И.В., Конюшкин В.А., Пухов К.К., Гласбик М. *Квантовая электроника*, **25**, 187 (1998); Басиев Т.Т., Ермаков И.В., Конюшкин В.А., Пухов К.К. *Квантовая электроника*, **31**, 424 (2001).
6. Basiev T.T., Doroshenko M.E., Zverev P.G., Skorniyakov V.V. *Tech. Dig. Conf. on Advanced Solid-State Lasers* (Washington, DC, OSA, 2001, p. 54).
7. *Tech. Dig. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies* (Moscow: URSS Publishers, 2002).
8. Басиев Т.Т., Зверев П.Г., Карасик А.Я., Осико В.В., Соболев А.А., Чунаев Д.С. *ЖЭТФ*, **126** (5), 1073 (2004).