

Прямое усиление пикосекундных импульсов в кристаллах $\text{LiF} : \text{F}_2^-$

Т.Т.Басиев, С.В.Гарнов, В.И.Вовченко, А.Я.Карасик, С.М.Климентов, В.А.Конюшкин,
С.Б.Кравцов, А.А.Малютин, А.Г.Папашвили, П.А.Пивоваров, Д.С.Чунаев

Создан усилитель пикосекундных импульсов с выходной мощностью до 10^{10} Вт и энергией до 30 мДж на длине волны $\lambda = 1180$ нм на основе кристаллов с центрами окраски $\text{LiF} : \text{F}_2^-$. Пробный пикосекундный сигнал с $\lambda = 1180$ нм, энергией 0.03 мДж и длительностью 3–5 пс создавался ВКР-излучением, полученным при внутривибрационном преобразовании частоты в лазере на кристалле $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2 : \text{Nd}^{3+}$, работающем в режиме пассивной синхронизации мод. В качестве наносекундного излучения накачки кристаллов $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ используется излучение $\text{Nd} : \text{YLF}$ -лазера ($\lambda = 1053$ нм) с последующим усилением в фосфатном стекле ГЛС-22 до энергии 5 Дж. Усиление пробных ВКР-импульсов происходит в четырехкристальном двухкаскадном усилителе на кристаллах $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ с общей длиной активной среды 360 мм по встречной схеме. Измерены зависимости выходной энергии излучения от энергии накачки и величины входного сигнала.

Ключевые слова: пикосекундные импульсы, ВКР-генератор, усилитель на центрах окраски, синхронизация мод.

Созданию лазерных установок пико- и фемтосекундного диапазонов с тераваттной мощностью в последние годы уделяется большое внимание [1–3]. Это связано с тем, что лазеры данного типа все чаще и чаще применяются для генерации импульсов излучения в рентгеновском диапазоне, используемых при исследовании сверхбыстрых процессов, в технологии обработки материалов, в фотохимии, фотобиологии и медицине.

Многообразие подобных установок ограничивается тем, что в настоящее время имеется малое число эффективных усиливающих активных сред с большой площадью поперечного сечения (100–1000 см²) и высокой лучевой стойкостью. Примерами таких сред могут служить лазерные стекла, активированные ионами Nd и Yb, кристаллы сапфира с Ti, нелинейные кристаллы KDP [1].

Год назад в качестве такой широкоапертурной усиливающей среды были предложены кристаллы фторида лития с F_2^- -центрами окраски [4]. За последние двадцать лет достигнута высокая эффективность их применения при получении различных режимов лазерной генерации – от непрерывного до режима генерации фемтосекундных импульсов [5, 6]. На широкоапертурных кристаллах $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ с сечением 20 × 4 см получена рекордная по мощности (10^9 Вт) генерация наносекундных перестраиваемых импульсов [7]. Реализованы одночастотный и сверхширокополосный ($\Delta\lambda \geq 100$ нм) режимы генерации [6, 8]. Продемонстрированы высокие эффективности (20 % – 40 %) генерации лазерного излучения в спектральной области 1090–1290 нм и усиления при накачке широко распространенными неодимовыми лазерами [9].

Всё это позволило использовать широкоапертурные кристаллы $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ в качестве базовых лазерных элементов для построения мощной мультитераваттной лазерной системы с прямым усилением пико- и фемтосекундных импульсов с нано- и микроджоулевой энергией до энергий джоульного диапазона. Особенностью данного проекта являются новые генерируемые диапазоны длин волн: 1100–1260 нм (основное излучение) и 550–630 нм, 366–420 нм, 275–315 нм (гармоники основного излучения).

В работе [6] было продемонстрировано эффективное усиление наносекундных импульсов в кристаллах LiF с F_2^+ - и F_2^- -центрами окраски. Недавно пикосекундные импульсы были впервые усилены в кристаллах $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ при синхронной пико- и наносекундной лазерной накачке с относительно высоким (более 30 дБ) коэффициентом усиления [4].

К достоинствам кристалла LiF как активной среды можно отнести широкий диапазон оптической прозрачности, высокую теплопроводность (превышающую таковую для $\text{YAG} : \text{Nd}$), минимальные по сравнению с оксидными кристаллами и другими твердыми телами линейный и нелинейный показатели преломления n и n_2 , а также минимальные дисперсии в области генерируемых длин волн.

Полосы поглощения и усиления в кристалле $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ простираются от ~ 850 до 1150 нм и от ~ 1000 до 1300 нм соответственно. Такие широкие полосы перспективны для усиления сверхкоротких импульсов с длительностью до нескольких фемтосекунд. Спектральное положение полос поглощения и люминесценции предопределяет выбор источников, которые могут быть использованы для усиления и накачки активных кристаллов $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ [4].

В настоящей работе мы исследуем схему усиления пикосекундных импульсов в кристаллах $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ при встречной наносекундной накачке. Схема включает в себя $\text{Nd}^{3+} : \text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{Nd} : \text{KGW}$)-лазер, генерирующий в режиме пассивной синхронизации мод пикосекундные

Т.Т.Басиев, С.В.Гарнов, В.И.Вовченко, А.Я.Карасик, С.М.Климентов, В.А.Конюшкин, С.Б.Кравцов, А.А.Малютин, А.Г.Папашвили, П.А.Пивоваров, Д.С.Чунаев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: basiev@lst.gpi.ru

импульсы излучения как на основной длине волны 1067 нм, так и на длине волны ВКР 1180 нм с длительностью 3–5 пс [10]. Полученное пробное ВКР-излучение усиливается в трех каскадах усилителей на LiF:F_2^- сначала при продольной попутной пикосекундной накачке с $\lambda = 1067$ нм, а затем при наносекундной встречной накачке с $\lambda = 1053$ нм. Наносекундная накачка создается одночастотным Nd:YLF-лазером с усилителями на фосфатном неодимовом стекле. Коэффициент усиления трехкаскадной системы на LiF:F_2^- превышает 33 дБ. В результате получены пикосекундные импульсы с энергией 25–30 мДж и пиковой мощностью до 10^{10} Вт.

Экспериментальная установка, общая схема которой представлена на рис.1, состояла из двух синхронизованных по времени задающих генераторов на кристаллах КГВ: Nd (1) и YLF: Nd (2), предусилителя 7, двух последующих усилительных каскадов УКИ 8, 9 и соответствующих им двух усилительных каскадов наносекундного излучения накачки 4, 6. Пучки наносекундной накачки ($\lambda = 1053$ нм) и пробного излучения УКИ ($\lambda = 1180$ нм) распространялись коллинеарно во встречных направлениях, а их оптические пути выравнивались для одновременного создания инверсной населенности в кристалле LiF:F_2^- , время жизни возбужденного состояния в котором составляет 55 нс.

Генерация УКИ осуществлялась в резонаторе длиной 120 см с активным элементом размером $\varnothing 5 \times 70$ мм из КГВ: Nd и пассивным затвором на основе красителя, введенного в полимерную матрицу. Коэффициент отражения выходного зеркала равнялся 35%. Пассивный затвор располагался на клиновидном глухом зеркале с коэффициентом отражения 100%. В резонатор помещена диафрагма, выделяющая моду TEM_{00} . Мощные внутрирезонаторные пикосекундные импульсы основного излучения ($\lambda = 1067$ нм) в матрице КГВ генерировали ВКР-излучение на первой стоксовой компоненте ($\lambda = 1180$ нм) со сдвигом частоты 901 см^{-1} . Число УКИ в пучке основной генерации составляло 10–12, а импульсов ВКР-излучения ($\lambda = 1180$ нм) – обычно 2–3 (рис.2). Общая энер-

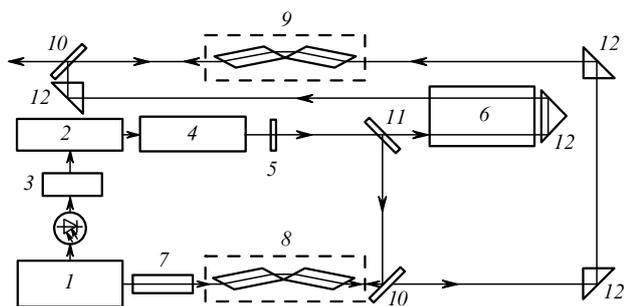


Рис.1. Схема лазерной установки:

1 – пикосекундный Nd: КГВ-генератор с пассивной синхронизацией мод и внутрирезонаторным ВКР-преобразованием; 2 – задающий генератор наносекундного одномодового излучения накачки кристалла YLF: Nd; 3 – блок управления запуском лазера накачки; 4 – промежуточный трехпроходный усилитель на фосфатном стекле ($\varnothing 8 \times 120$ мм); 5 – пластина $\lambda/2$; 6 – двухпроходный усилитель с апертурой 45 мм на фосфатном стекле; 7 – предусилитель на LiF:F_2^- с синхронной пикосекундной накачкой; 8, 9 – усилительные каскады на LiF:F_2^- ($8 \times 17 \times 90$ мм и $17 \times 17 \times 90$ мм) с наносекундной накачкой; 10 – дихроичное зеркало; 11 – полупрозрачное зеркало; 12 – призмы.

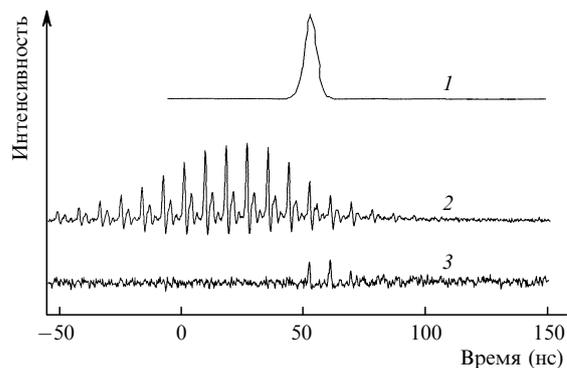


Рис.2. Оциллограммы наносекундного импульса Nd:YLF-лазера (1), излучения пикосекундного Nd: КГВ-лазера на основной частоте (2) и первой стоксовой компоненты ВКР-излучения (3).

гия пуча УКИ на основной частоте равнялась 1.5–2 мДж, а энергия УКИ стоксовой компоненты – 0.07–0.1 мДж. На выходе из ВКР-резонатора стоксово излучение и основное излучение проходят через кристалл-предусилитель LiF:F_2^- 7 (рис.1), в котором импульсы ВКР усиливаются при синхронной попутной пикосекундной накачке излучением на основной частоте [4].

Часть пикосекундного излучения Nd: КГВ-лазера на основной частоте направлялась на лавинный фотодиод для управления затвором задающего наносекундного генератора излучения накачки, представлявшего собой одночастотный лазер на кристалле YLF: Nd с активной модуляцией добротности ячейкой Поккельса [11]. Кристалл YLF: Nd был вырезан, а резонатор настроен так, чтобы генерировать импульсы на $\lambda = 1053$ нм, допускающей дальнейшее усиление в фосфатном стекле с неодимом. Длительность импульсов составляла 10–12 нс, а выходная энергия характеризовалась высокой стабильностью и достигала 5 мДж. Временная синхронизация обоих лазеров иллюстрируется схемой, приведенной на рис.2. Уровень запуска схемы выбирался таким, чтобы с учетом задержки генерации импульс Nd: YLF-лазера совпадал с первым импульсом ВКР-излучения. В случае генерации лазером на КГВ: Nd воспроизводимых пучков излучения нестабильность запуска Nd: YLF-генератора не превышала половины аксиального периода (8 нс).

Далее излучение Nd:YLF-лазера направлялось в трехпроходный предварительный усилитель на стекле ГЛС-22 4 размером $\varnothing 8 \times 120$ мм (рис.1), на выходе которого энергия достигала 150 мДж при частоте следования импульсов до 1 Гц. Около 60% этой энергии использовалось для накачки первого наносекундного усилительного каскада 8 на двух кристаллах LiF:F_2^- ($8 \times 17 \times 90$ мм), вырезанных под углом Брюстера. Полуволновая пластинка 5, осуществляющая вращение поляризации, позволяла минимизировать потери на отражение от торцов кристаллов-усилителей LiF:F_2^- .

Экспериментальная зависимость энергии на выходе первого наносекундного LiF_2^- -усилителя 8 от входной энергии УКИ ($\lambda = 1180$ нм) при фиксированной энергии накачки 130 мДж показана на рис.3. Энергия измерялась пирозлектрическим приемником Molectron J3-05 с чувствительностью 2.6 В/мДж и регистрировалась осциллографом Tektroniks. Зависимость выходной энергии данного усилителя от энергии накачки кристалла LiF:F_2^- при фиксированной входной энергии УКИ (0.05 мДж) представлена на рис.4. Энергия накачки варьировалась с помощью нейтральных светофильтров НС. Видно, что

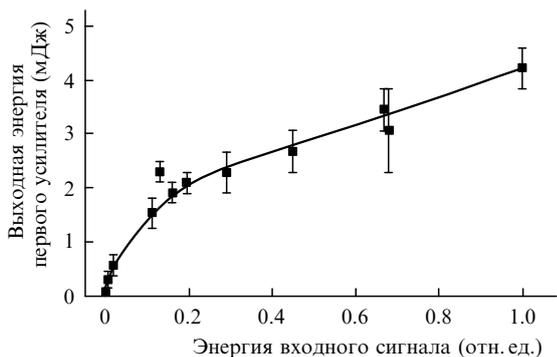


Рис.3. Зависимость выходной энергии первого наносекундного усилителя от энергии входного сигнала при энергии накачки кристалла LiF:F_2^- , равной 130 мДж.

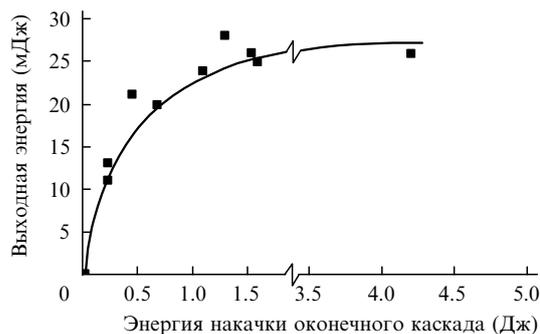


Рис.5. Зависимость выходной энергии ($\lambda = 1180$ нм) усилительной системы (LiF:F_2^-) от энергии накачки оконечного каскада ($\lambda = 1053$ нм).

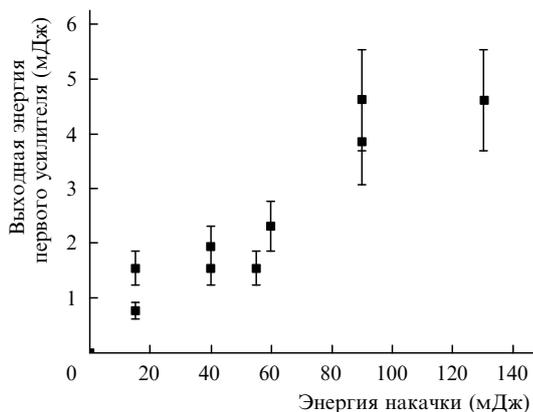


Рис.4. Зависимость выходной энергии первого наносекундного усилителя от энергии накачки кристалла LiF:F_2^- при входной энергии УКИ, равной 0.05 мДж.

КПД усилителя достигает 5% при коэффициенте усиления каскада, меньшем или равном 20 дБ.

Значительный разброс данных связан со стохастическим характером процессов пассивной синхронизации мод и ВКР в нелинейной среде задающего лазера, а также с флуктуациями времени прихода наносекундной накачки и усиливаемого пикосекундного ВКР-импульса. Отметим, что если до пикосекундного предварительного усилителя 7 входная энергия распределялась по двум-трем импульсам, то после него она сосредоточена в одном усиленном пикосекундном импульсе.

Дальнейшее усиление излучения УКИ импульсов во втором каскаде наносекундного усилителя 9 (рис.1) проводилось с помощью двух кристаллов LiF:F_2^- , имеющих размеры $17 \times 17 \times 90$ мм и расположенных под углом Брюстера к входящему излучению. Их накачка осуществлялась излучением мощного двухпроходного наносекундного усилителя на фосфатном стекле ГЛС-22 ($\varnothing 45 \times 680$ мм), на вход которого поступало излучение с $\lambda = 1053$ нм и энергией около 60 мДж, а выходная энергия достигала 5 Дж. Использование широкоапертурного стеклянного стержня ограничивало частоту следования импульсов одним выстрелом в минуту. Результаты измерений усиления в этом двухкристальном усилителе 9 представлены на рис.5. Видно, что насыщение усиления наступает при плотности энергии накачки $0.3 - 0.4$ Дж/см² и

дальнейшее повышение ее до 1.5 Дж/см² не приводит к увеличению выходной энергии.

Измерение длительности УКИ, проведенное с помощью электронно-оптической камеры Imacon-500, показало, что длительность импульсов на основной частоте генератора УКИ составляла 8 – 15 пс, а для ВКР-импульсов была равна 3 – 5 пс. Выходная мощность пикосекундных импульсов излучения с $\lambda = 1180$ нм после второго наносекундного усилителя достигала 10^{10} Вт.

В заключение отметим, что дальнейшее развитие систем усиления пикосекундных импульсов на основе кристаллов LiF:F_2^- допускает масштабирование апертуры кристаллов более чем в 100 раз и позволяет рассчитывать на стократное увеличение коэффициентов усиления и выходной энергии сверхкоротких импульсов.

Работа выполнена по Госконтракту № 02.452.11.7072 и при поддержке РФФИ (грант № 04-02-08163 оф-а).

1. Tajima T., Mourou G. *Phys. Rev. Special Topics*, **5**, 031301 (2002).
2. Lozhkarev V.V., Friedman G.I., Ginzburg V.N., et al. *Techn. Dig. Conf. on Advanced Solid-State Photonics* (Incline Village, Nevada, USA, OSA, 2006, MA-3).
3. Bayramian A., Armstrong P., Ault E., et al. *Techn. Dig. Conf. on Advanced Solid-State Photonics* (Incline Village, Nevada, USA, OSA, 2006, MA-4).
4. Басиев Т.Т., Карасик А.Я., Коношкин В.А., Осико В.В., Папашвили А.Г., Чунаев Д.С. *Квантовая электроника*, **35** (4), 344 (2005).
5. Basiev T.T., Mirov S.B. *Room Temperature Tunable Color Center Lasers (Laser Science and Technology Book Series. Vol. 16)* (New York: Gordon and Breach Science/Harwood Academic, 1994, pp 1 – 160).
6. Basiev T.T., Zverev P.G. Mirov S.B. In: *Handbook of Laser Technology and Applications* (Bristol: Institute of Physics Publishing, 2004, pp 499 – 522).
7. Басиев Т.Т., Ершов Б.В., Кравцов С.Б., Миров С.Б., Спиридонов В.А., Федоров В.Б. *Квантовая электроника*, **12** (6), 1125 (1985).
8. Федоров В.В., Зверев П.Г., Басиев Т.Т. *Квантовая электроника*, **31** (4), 285 (2001).
9. Басиев Т.Т., Зверев П.Г., Папашвили А.Г., Федоров В.В. *Квантовая электроника*, **24** (7), 591 (1997).
10. Андрионас К., Вишакас Ю., Кабелка В. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **42**, 333 (1985).
11. Freidman G., Andreev N., Ginzburg V., Katin E., Khazanov E., Lozhkarev V., Palashov O., Sergeev A., Yakovlev I. *Proc Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), OSA Trends in Optics and Photonics* (Washington, D.C., OSA, 2002, p. CPDA9-1).