

# Тонкостержневые активные элементы для усиления фемтосекундных импульсов

М.Р.Волков, И.И.Кузнецов, И.Б.Мухин, О.В.Палашов, А.В.Конященко, С.Ю.Теняков, Р.А.Ливенцов

*Для исследования возможности усиления излучения фемтосекундных волоконных лазеров в тонкостержневых активных элементах разработаны усилительные модули на основе таких элементов из широкополосных сред  $\text{Yb}:\text{CaF}_2$  и  $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ . Показано, что величина усиления в элементах из  $\text{Yb}:\text{YAG}$  и в  $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$  ограничена усилением только части широкополосного сигнала, а в элементах из  $\text{Yb}:\text{CaF}_2$  усиление осуществляется в более широком спектральном диапазоне, но оно невелико из-за малости сечения усиления. В режиме регенеративного усиления продемонстрировано усиление с субмикроджоульного до субмиллиджоульного уровня. При этом новые широкополосные среды  $\text{Yb}:\text{CaF}_2$  и  $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$  позволяют усиливать существенно более широкополосное излучение, чем  $\text{Yb}:\text{YAG}$ .*

**Ключевые слова:** фемтосекундные лазерные импульсы, тонкостержневые активные элементы, лазерные среды с иттербием, сужение спектра.

## 1. Введение

Объединение волоконного фемтосекундного лазера с твердотельным оконечным усилителем является одним из наиболее перспективных путей создания простых, стабильных и надежных фемтосекундных лазеров с миллиджоульным уровнем энергии в импульсе и средней мощностью в десятки ватт. Твердотельные усилители в таких системах должны обеспечивать усиление на 2–3 порядка выше, быть простыми и надежными в использовании и не подверженными тепловым эффектам. Одним из перспективных подходов к решению этой задачи является разработка твердотельного усилителя на основе тонкостержневого активного элемента [1]. Небольшой диаметр активного элемента (менее 1 мм) позволяет обеспечивать эффективный теплоотвод, а его длина (до 4 см) в условиях диодной накачки позволяет достичь большого усиления за один проход. На сегодняшний день при усилении сигнала в тонкостержневых  $\text{Yb}:\text{YAG}$ -активных элементах продемонстрировано получение энергии в импульсе свыше 2 мДж [2, 3] и средней мощности более 160 Вт [4]. Однако при усилении излучения волоконных фемтосекундных лазеров недостаточно широкая полоса усиления активных элементов из  $\text{Yb}:\text{YAG}$  не позволяет сохранить длительность импульсов. Действительно, характерная минимальная длительность импульсов при усилении в  $\text{Yb}:\text{YAG}$  составляет 500–1000 фс в зависимости от величины усиления [5, 6], тогда как длительность импульса высокомоульных фемтосекундных лазеров, требующих дополнительного усиления, может составлять менее 200 фс. В связи с этим разработка столь же надежных и высоко-

эффективных усилителей, как тонкостержневые элементы из  $\text{Yb}:\text{YAG}$ , но с большей шириной полосы усиления, остается актуальной.

В настоящей работе исследована возможность увеличения полосы усиления тонкостержневых активных элементов за счет использования новых для данной геометрии материалов. Разработаны и изготовлены усилительные модули на основе таких элементов из широкополосных сред  $\text{Yb}:\text{CaF}_2$  и  $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ . Исследовано усиление широкополосного сигнала в разработанных модулях, выполнено сравнение и показано, что они обеспечивают более широкополосное эффективное усиление, чем модули на основе тонкостержневого активного элемента из  $\text{Yb}:\text{YAG}$ .

## 2. Исследование спектральных характеристик лазерных сред $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Yb}:\text{CaF}_2$

Описанный в работе [7] альтернативный способ изготовления усилительных модулей с тонкостержневыми активными элементами позволяет использовать не только материалы, полученные методом вертикального вытягивания [8], но и другие кристаллические и керамические материалы. Такой подход значительно расширяет возможность оптимизации тонкостержневых активных элементов для решения той или иной задачи за счет использования лазерных сред, легированных иттербием. Одними из наиболее перспективных материалов для тонкостержневых элементов являются полутороксидные керамики  $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  и др., что обусловлено их высокой теплопроводностью и более широкой полосой усиления по сравнению с  $\text{Yb}:\text{YAG}$ . Наиболее широкой полосой усиления среди легированных иттербием материалов обладают кристаллы семейства фторидов:  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$  и др. Эти среды имеют хорошие термооптические характеристики, их основным недостатком является небольшое сечение усиления.

В исследуемых материалах  $\text{Yb}:\text{YAG}$  (3 ат.%),  $\text{Yb}:\text{CaF}_2$  (0.5 ат.%) и  $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$  (0.5 ат.%) описанным в работах [9, 10] методом были измерены спектральные распределения сечений поглощения и усиления, а также времена

М.Р.Волков, И.И.Кузнецов, И.Б.Мухин, О.В.Палашов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: bearuck@mail.ru, kuznetsov@ipfran.ru  
А.В.Конященко, С.Ю.Теняков, Р.А.Ливенцов. ООО «Авеста-Проект», Россия, 108840 Троицк, Москва, ул. Физическая, 11; e-mail: fs@avesta.ru, tenyakov@avesta.ru

Поступила в редакцию 7 февраля 2019 г.

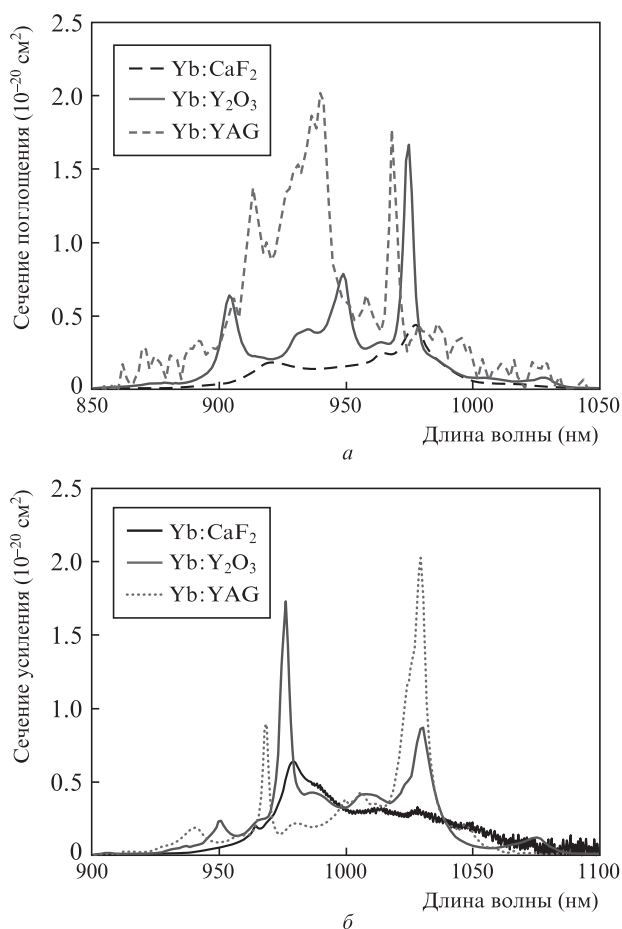


Рис.1. Спектральные зависимости сечений поглощения и усиления в исследуемых материалах.

жизни на верхнем лазерном уровне. Из рис. 1 следует, что спектр усиления Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в 1.5 раза шире, чем Yb:YAG, но величина сечения усиления в два раза меньше. Ширина спектра сечения усиления Yb:CaF<sub>2</sub> гораздо больше, чем Yb:YAG или Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, однако сечение усиления в несколько раз меньше. Измеренные значения времен жизни составляют 0.95 мс в Yb:YAG, 1 мс в Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 2 мс в Yb:CaF<sub>2</sub>, различие между ними влияет на величину усиления незначительно. Таким образом, можно ожидать, что в разрабатываемые квантроны позволят существенно увеличить ширину полосы усиления при меньшем коэффициенте усиления за один проход.

На основе выполненных измерений была определена оптимальная длина волны излучения накачки, рассчитана длина активных элементов, необходимая для эффективного поглощения излучения накачки, и разработаны усилительные модули. Из кристалла Yb:YAG (3 ат.%) был изготовлен элемент длиной 10 мм и диаметром 0.8 мм для накачки с  $\lambda = 940$  нм. Ширина линии поглощения в области 975 нм в Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> больше, чем в Yb:YAG, что позволяет использовать для его накачки лазерные диоды с этой длиной волны. Активный элемент из Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1 ат.%) имел длину 15 мм и диаметр 1 мм. Для элемента из Yb:CaF<sub>2</sub> также можно использовать излучение накачки с  $\lambda = 975$  нм. Для этой длины волны оптимальная длина элемента из Yb:CaF<sub>2</sub> (0.5 ат.%) составила 12 мм при диаметре 1.2 мм. Усилительные модули из подготовленных тонкостержневых активных элементов были изготовлены описанным в работе [7] методом.

### 3. Прямое усиление широкополосного сигнала в изготовленных лазерных модулях

Усилительные модули исследовались в режиме усиления слабого широкополосного сигнала. Оптическая схема измерения усиления представлена на рис.2. В качестве источника излучения использовался волоконный фемтосекундный лазер с шириной полосы излучения 8 нм и центральной длиной волны 1030 нм. Часть этого излучения со средней мощностью 200 мВт направлялась в исследуемый образец и совмещалась с излучением лазерного диода (ЛД) накачки дихроичными зеркалами. Фокусировка лазерного излучения линзой Л1 с фокусным расстоянием 75 мм обеспечивала диаметр лазерного пучка 0.2 мм в области исследуемого элемента, накачка которого осуществлялась высокоярким лазерным диодным модулем с волоконным выходом излучения. Диаметр волокна составлял 105 мкм при числовой апертуре 0.22. Излучение накачки на выходе волокна коллимировалось асферической линзой Л2 и фокусировалось в тонкостержневой активный элемент с увеличением 3<sup>х</sup> (линзы установлены в коллиматоре), при этом диаметр пятна накачки в элементе составлял 0.3 мм. Непоглощенная часть излучения направлялась обратно в элемент сферическим зеркалом СЗ с высоким коэффициентом отражения и радиусом кривизны 50 см. Накачка активного элемента из Yb:YAG осуществлялась диодным модулем с длиной волны 940 нм и максимальной мощностью 100 Вт, а элементов из Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub> – диодным модулем с длиной волны 975 нм. Совмещение пучков накачки и усиливаемого излучения обеспечивалось дихроичными зеркалами ДЗ. Усиленный сигнал направлялся в измеритель мощности, а оставшаяся часть излучения накачки отфильтровывалась пространственным фильтром (линза Л2 и диафрагма Д).

Результаты измерений усиления сигнала представлены на рис.3. Учитывая, что на вход в усилитель направлялось излучение небольшой средней мощности, можно считать, что измерения были выполнены в приближении слабого сигнала. Видно, что в элементе из Yb:YAG усиление больше, чем в образцах Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub>, но значительно меньше достигнутого при усилении узкополосного излучения [3]. Небольшое усиление в Yb:YAG и в Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> объясняется тем, что усиливается только часть входного широкополосного сигнала. Напротив, элемент из Yb:CaF<sub>2</sub> осуществляет усиление всех спектральных составляющих входного сигнала, но оно невелико из-за малости сечения усиления. Используя в усилительном элементе конусные активные элементы [11] или двух- или четырехпроходную схему, можно в несколько раз увеличить усиление широкополосного сигнала в исследуемых средах.

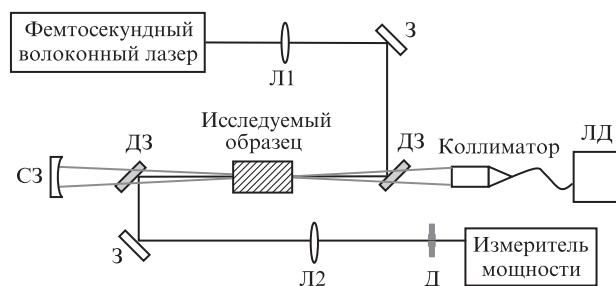


Рис.2. Оптическая схема измерения усиления широкополосного сигнала в исследуемых образцах.

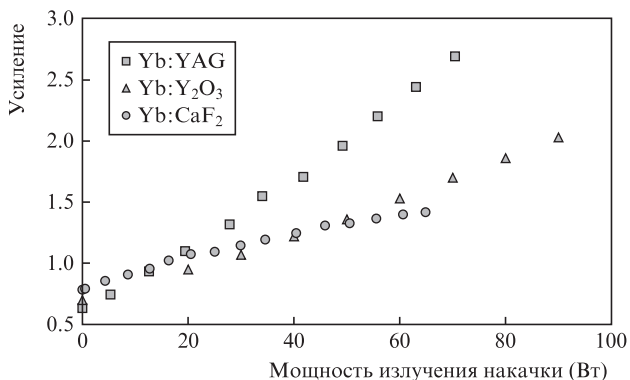


Рис.3. Зависимости усиления от мощности накачки в исследуемых лазерных модулях.

### 4. Регенеративное усиление в изготовленных усилительных модулях

Как уже было сказано, разработанные тонкостержневые лазерные модули могут обеспечить усиление широкополосного фемтосекундного излучения в несколько раз. При этом в случае усиления в элементах из Yb:YAG и Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> будет наблюдаться спектральное сужение сигнала, что уменьшает пиковую мощность фемтосекундных лазерных импульсов. Для элементов из Yb:CaF<sub>2</sub> оно несущественно, однако их усиление довольно мало. Чтобы определить предельную величину полосы усиления, исследуемые лазерные модули были протестированы в режиме регенеративного усиления (рис.4). Излучение фемтосекундного лазера с энергией в импульсе до 1 мкДж через изолятор Фарадея Ф1 направляется в традиционную схему регенеративного усилителя. Совмещение пучков накачки и усиливаемого излучения обеспечивается дихроичными зеркалами ДЗ. Плоские зеркала З и сферические зеркала С32 с радиусами кривизны 80 см образуют устойчивый резонатор. Переключение ячейки Погкельса ЯП в сочетании с поляризатором П и пластинкой λ/4 обеспечивает ввод и вывод лазерного излучения в резонатор регенеративного усилителя с регулируемым числом проходов через него. Установленный в резонаторе тонкостержневой элемент обеспечивает усиление сигнала. При исследовании элементов из Yb:YAG и Yb:CaF<sub>2</sub> частота следования импульсов составляла 11 кГц в случае 14 проходов через активный элемент, а фемтосекундный импульс был растянут до 50 пс. Измерения усиления лазерного модуля из Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выполнялись при частоте сле-

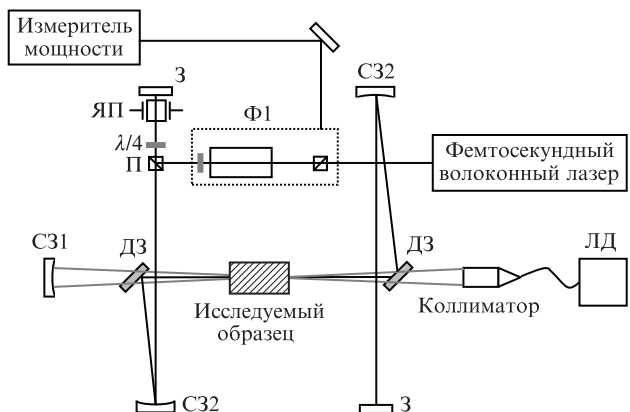


Рис.4. Оптическая схема регенеративного усиления широкополосного сигнала в исследуемых образцах.

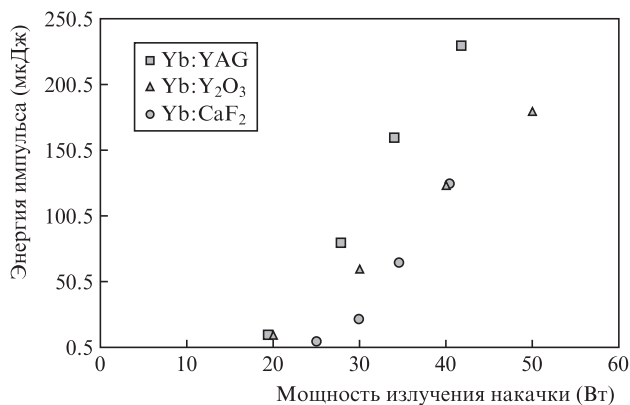


Рис.5. Зависимости энергии импульса E на выходе регенеративного усилителя от мощности накачки P в исследуемых лазерных модулях.

дования 50 кГц, при этом длительность растянутого импульса составляла 200 пс.

Результаты измерений регенеративного усиления представлены на рис.5 и 6. Видно, что во всех трех активных средах достигнуто существенное усиление (с субмикроджоульного до субмиллиджоульного уровня). Дальнейшее увеличение энергии в импульсе было ограничено возможностью оптического пробоя тонкостержневых активных элементов. Чуть меньший наклон зависимости E(P) для Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на рис.5 объясняется повышенной частотой следования импульсов. Более существенное различие результатов наблюдается для спектральных распределений усиленных сигналов (рис.6). При усилении в лазерном модуле с Yb:YAG спектр исходного сигнала (8 нм) сужается до 1.4 нм, что соответствует спектрально ограниченной длительности импульса ~800 фс. Согласно рис.1, ширина спектра сечения усиления в Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> примерно в 1.5 раза больше, чем в Yb:YAG. Это соотношение сохраняется и при регенеративном усилении. Ширина спектра усиленного сигнала в лазерном модуле с Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составила 2.2 нм, что соответствует спектрально ограниченной длительности импульса ~500 фс. Отметим, что при усилении в лазерном модуле с Yb:CaF<sub>2</sub> также наблюдается незначительное сужение спектра выходного сигнала, что, возможно, связано со спектрально зависимой функцией пропускания ячейки Погкельса, пластинки λ/4 и поляризатора. Тем не менее в тонкостержневом активном элементе из Yb:CaF<sub>2</sub> ширина полосы усиления со-

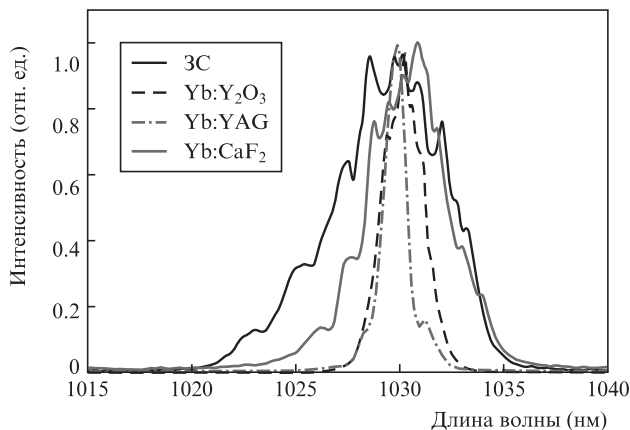


Рис.6. Спектральное распределение усиленного излучения, а также спектр задающего сигнала (3С).

ставила 4.5 нм, что соответствует спектрально ограниченной длительности импульса  $\sim 240$  фс.

## 5. Заключение

Разработаны и изготовлены усилительные модули на основе тонкостержневых активных элементов из новых для данной геометрии широкополосных сред Yb:CaF<sub>2</sub> и Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Исследованы спектральные характеристики этих лазерных сред, на основе полученных результатов определены оптимальные длины волн накачки и рассчитаны длины активных элементов. Измерено усиление широкополосного излучения в тонкостержневых усилительных модулях, использующих как традиционный для данной геометрии Yb:YAG, так и Yb:CaF<sub>2</sub> и Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Установлено, что усиление за проход в этом случае значительно меньше усиления узкополосного сигнала в Yb:YAG. Это объясняется как значительным сужением спектра усиливаемого сигнала (для Yb:YAG и Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), так и небольшим сечением усиления (для Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub>). Тем не менее во всех трех лазерных средах возможно прямое усиление широкополосного фемтосекундного излучения в несколько раз (например, при использовании двух- или четырехпроходной схемы усиления). В режиме регенеративного усиления продемонстрировано значительное усиление фемтосекундного сигнала и исследовано сужение спектра при усилении. Показано, что в лазерных модулях с тонкостержневыми активными элементами из новых лазерных сред (Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub>) можно обеспечить усиление лазерных импульсов с меньшей спектрально ограниченной длительностью, чем в аналогичном элементе из Yb:YAG.

Одним из основных недостатков исследуемых широкополосных сред в новой тонкостержневой геометрии является небольшая величина усиления. Однако этот не-

достаток можно устранить различными способами. Так, использование более длинноволновой накачки элементов из Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub> значительно уменьшает «дефект» кванта при усилении, что позволяет существенно увеличить пиковую мощность накачки по сравнению с элементом из Yb:YAG. Кроме того, усиление можно значительно увеличить, используя конусную геометрию тонкостержневого активного элемента. Эти подходы будут исследованы при дальнейшей работе по данному направлению.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 075-02-2018-183; уникальный идентификатор RFMEFI60718X0201).

1. Zaouter Y., Martial I., Aubry N., Didierjean J., Hönninger C., Mottay E., Druon F., Georges P., Balembois F. *Opt. Lett.*, **36**, 748 (2011).
2. Lesparre F., Gomes J.T., Délen X., Martial I., Didierjean J., Pallmann W., Resan B., Druon F., Balembois F., Georges P. *Opt. Lett.*, **41**, 1628 (2016).
3. Kuznetsov I., Mukhin I., Palashov O., Ueda K.-I. *Opt. Lett.*, **43** (16), 3941 (2018).
4. Markovic V., Rohrbacher A., Hofmann P., Pallmann W., Pierrot S., Resan B. *Opt. Express*, **23**, 25883 (2015).
5. Russbueltdt P., Mans T., Rotarius G., Weitenberg J., Hoffmann H.D., Poprawe R. *Opt. Express*, **17** (15), 12230 (2009).
6. Alismail A., Wang H., Brons J., Fattahi H. *J. Vis. Exp.*, **125**, E55717 (2017).
7. Kuznetsov I., Mukhin I., Vadimova O., Palashov O., Ueda K.-I. *Appl. Opt.*, **54** (25), 7747 (2015).
8. Délen X., Piehler S., Didierjean J., Aubry N., Voss A., Ahmed M.A., Graf T., Balembois F., Georges P. *Opt. Lett.*, **37**, 2898 (2012).
9. Snetkov I., Zhou D., Yakovlev A., Volkov M., Kuznetsov I., Mukhin I., Palashov O., Shi Y., Ueda K.-I. *Laser Phys. Lett.*, **15** (3), 035801 (2018).
10. Kühn H., Petermann K., Huber G. *Opt. Lett.*, **35** (10), 1524 (2010).
11. Kuznetsov I., Mukhin I., Palashov O., Ueda K.-I. *Opt. Lett.*, **41** (22), 5361 (2016).