

# Усилитель на тонком стержне из Yb:YAG с высокой энергией в импульсе для волоконного задающего лазера

И.И.Кузнецов, И.Б.Мухин, О.В.Палашов

*Продemonстрировано высокое (более 10 раз) усиление по слабому сигналу в активном элементе из кристалла Yb:YAG в форме тонкого стержня с волноводным распространением излучения накачки. На основе элемента создан четырех-проходный усилитель для волоконного задающего лазера со средней мощностью на выходе более 15 Вт при частоте следования импульсов 3 МГц. Усиление по слабому сигналу в разработанном усилителе составляет 26 дБ, что сравнимо с усилением в регенеративных усилителях. Показана возможность достижения импульсной энергии субмиллиджоульного уровня при частоте следования импульсов в десятки кГц.*

**Ключевые слова:** твердотельные лазерные усилители, Yb:YAG-лазеры с диодной накачкой, высокая средняя мощность.

## 1. Введение

Надежные и недорогие фемто- и субпикосекундные волоконные лазеры находят широкое применение в науке, промышленности и медицине. Однако их использованию препятствует слишком маленькая энергия в импульсе (не более нескольких мкДж). Обычно применяемые для увеличения энергии импульсов регенеративные усилители сложны в настройке, обладают слабым контрастом при усилении импульсов и могут вносить тепловые искажения излучения из-за ячейки Поккельса. Таким образом, разработка надежных и дешевых усилителей с высоким (два-три порядка) усилением безусловно актуальна, и одной из наиболее перспективных технологий в этом направлении является использование активных элементов (АЭ) в виде «тонкого стержня» [1, 2]. Усилители на основе таких АЭ обладают усилением более 100 раз в простой двухпроходной оптической схеме усиления, а энергия в импульсе может достигать 1 мДж при усилении чирпированных импульсов [3].

В настоящей статье представлены результаты разработки усилителя на основе квантрона с тонким стержневым элементом, изготовленным по оригинальной технологии из кристалла Yb:YAG [1, 4]. Представлены результаты измерения усиления по слабому сигналу в используемом квантроне, описана оптическая схема усиления и представлены результаты измерения энергетических характеристик усилителя (мощность излучения на выходе усилителя, усиление по слабому сигналу, оптическая эффективность усиления), а также результаты измерений пространственных, временных и спектральных искажений при усилении чирпированных импульсов.

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: palashov@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 8 февраля 2016 г.

## 2. Квантроны на тонких стержнях

Исследованы два квантрона с АЭ разной формы: 1-й стержень – цилиндрический (диаметр 1.2 мм, длина 30 мм) из кристалла Yb(1%):YAG; 2-й стержень – конусный (диаметры 1.2 и 0.6 мм, длина 30 мм) из такого же кристалла [4]. Оба АЭ впаены в медный теплоотвод; более подробно устройство квантронов описано в [1, 4]. На рис.1,а

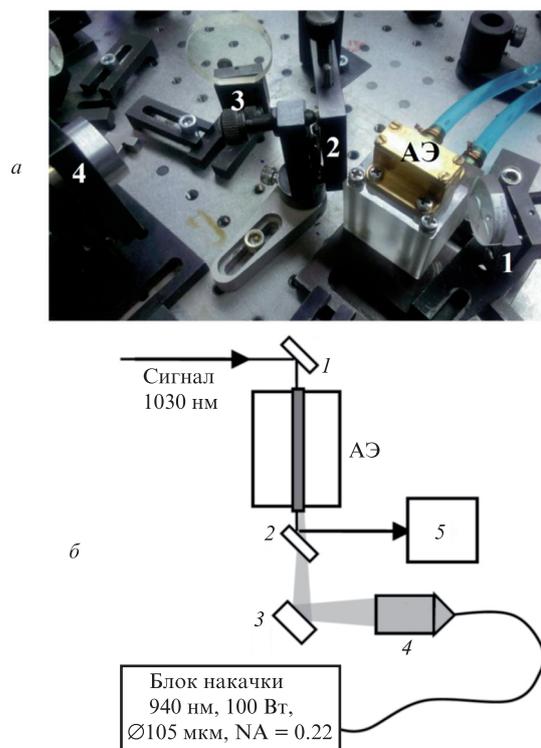


Рис. 1. Внешний вид квантрона на тонком стержне (а) и принципиальная схема измерения усиления (б): 1, 2 – дихроичные зеркала, отражающие сигнал на  $\lambda = 1030$  нм и пропускающие накачку на  $\lambda = 940$  нм; 3 – заводящее зеркало; 4 – коллиматор накачки; 5 – измеритель мощности.

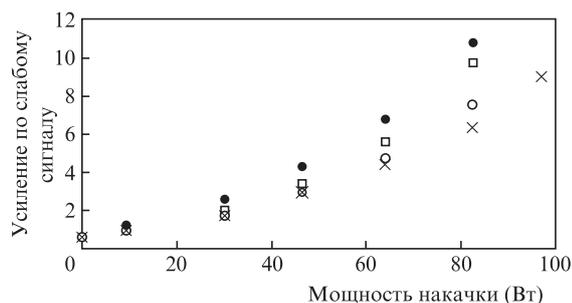


Рис.2. Зависимости усиления по слабому сигналу в импульсном и непрерывном режимах накачки: отмечено усиление в цилиндрическом стержне при непрерывной накачке (x), усиление по слабому сигналу в конусном стержне в импульсном (●) и непрерывном (○) режимах накачки, а также усиление по слабому сигналу для широкополосного ( $\Delta\lambda = 1.6$  нм) излучения (o).

представлен внешний вид квантрона с зеркалами для усиливаемого излучения и накачки. Пучок усиливаемого излучения (длина волны  $\lambda = 1030$  нм) диаметром 0.3 мм подается в АЭ через дихроичное зеркало 1 и отражается в измеритель мощности дихроичным зеркалом 2. Излучение диодного лазера накачки (длина волны 940 нм) с волоконным выводом (диаметр волокна 105 мкм, числовая апертура 0.22) и максимальной мощностью 100 Вт из коллиматора направляется в АЭ навстречу распространению усиливаемого излучения. Юстировки коллиматора 4 и зеркала 3 используются для соосной настройки АЭ и пучка накачки. Объектив коллиматора переносит изображение с выходного торца волокна на входной торец АЭ с четырехкратным увеличением. Пропускание схемы на сигнальной длине волны (1030 нм) составляет 63% (из-за поглощения в Yb:YAG), а на длине волны накачки – 10%.

Результаты измерений усиления по слабому сигналу в импульсном (длительность импульсов 5 мс, частота следования 5 Гц) и непрерывном режимах накачки приведены на рис.2. Видно, что в конусном стержне усиление значительно больше, чем в цилиндрическом, из-за более однородной «прокачки» объема АЭ. Благодаря использованию накачки с меньшей расходимостью, чем в работе [1], удалось достичь значительного увеличения усиления по слабому сигналу. Усиление в непрерывном режиме накачки близко к усилению в импульсном режиме, что подтверждает малость тепловых эффектов в исследуемом АЭ. Само значение усиления близко к полученным в [2, 3, 5].

### 3. Усилитель на тонком стержне

Источником задающего сигнала служила лазерная система [6]. Сигнал фемтосекундного волоконного лазера (~300 фс) делится на две части, длительность одной из них дополнительно растягивается в объемных брэгговских решетках вплоть до 2 нс в зависимости от числа проходов излучения через решетки. Более подробно схема четырехпроходного усилителя с конусным АЭ представлена на рис.3. На входе в усилитель средняя мощность сигнала составляет 0.22 Вт и может быть уменьшена вращением пластинки  $\lambda/2$ , установленной перед изолятором Фарадея (Ф1). Частота следования импульсов составляет 3 МГц. Затем излучение проходит через изолятор Фарадея, обеспечивающий как защиту задающей лазерной системы, так и организацию двух последних обходов излучения. Линзой Л1 ( $f = 70$  см), находящейся на расстоянии 60 см от АЭ (перед ним), излучение фокусируется так,

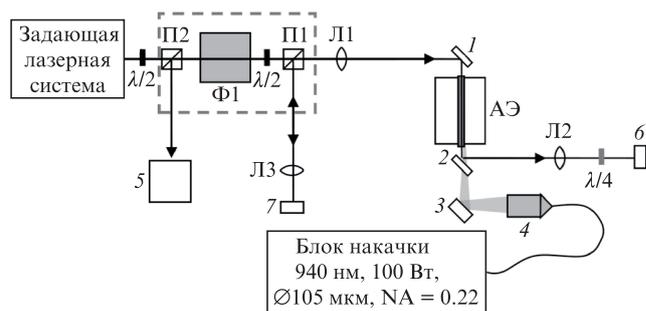


Рис.3. Схема четырехпроходного усилителя с АЭ в виде тонкого стержня:

1, 2 – дихроичные зеркала, отражающие сигнал на 1030 нм и пропускающие излучение накачки на 940 нм; 3 – заводящее зеркало; 4 – коллиматор накачки; 5 – измеритель мощности; 6, 7 – плоские зеркала.

чтобы диаметр пучка на входе в АЭ составлял 400 мкм, а на выходе – 300 мкм. Линза Л2 выбирается и настраивается таким образом, чтобы коллимировать излучение после перетяжки линзы Л1: это позволяет одновременно компенсировать довольно сильную тепловую линзу в стержневом АЭ. Затем зеркалом 6 излучение направляется обратно, а пластинка  $\lambda/4$  обеспечивает его выход через поляризатор П1. Два последних прохода через АЭ обеспечиваются обратным зеркалом 7 и развязкой излучения в изоляторе Фарадея Ф1. Необходимый диаметр и расходимость излучения при двух обратных проходах в области АЭ обеспечиваются выбором и юстировкой линзы Л3, а также расстоянием между этой линзой и зеркалом 7. Усилитель занимает площадь 70 см × 50 см, и габариты могут быть легко уменьшены примерно в 2 раза при помощи поворотных зеркал.

При мощности излучения на входе 0.22 Вт и мощности накачки 82 Вт на выходе усилителя получена мощность до 15 Вт (рис.4,а). Полное усиление составило 18 дБ при оптической эффективности 18.3%. Учитывая, что 10% излучения накачки выходит из АЭ, можно говорить об оптической эффективности в 20.3%, поскольку это излучение может быть сфокусировано и направлено обратно в АЭ. При частоте следования импульсов 3 МГц энергия в каждом импульсе составила 5 мкДж. На рис.5 пред-

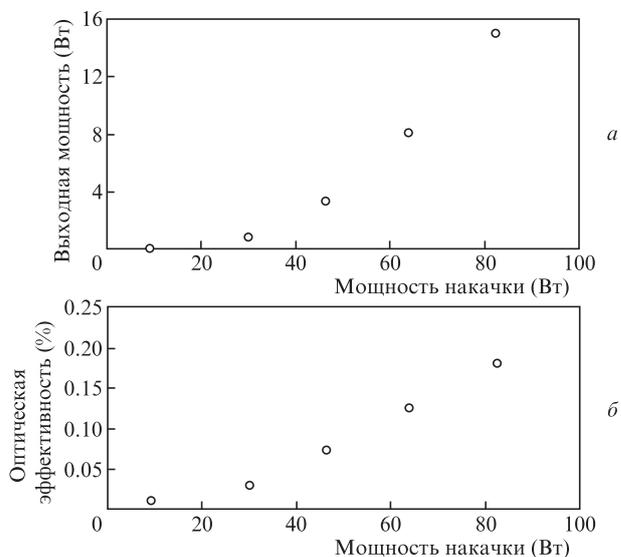


Рис.4. Зависимости выходной мощности излучения (а) и оптической эффективности усилителя (б) от мощности накачки.

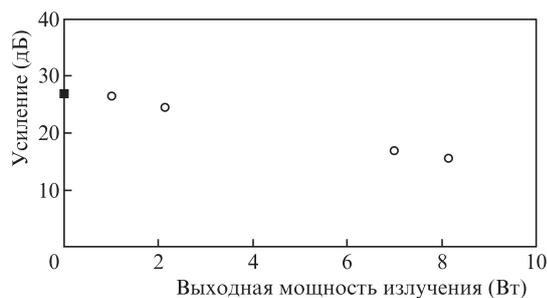


Рис.5. Зависимость усиления от выходной мощности излучения при мощности накачки 64 Вт. Черный квадрат – значение усиления по слабому сигналу за один проход, возведенное в 4-ю степень.

ставлена зависимость усиления от выходной мощности излучения при мощности накачки 64 Вт. При входной мощности излучения 2.3 мВт его выходная мощность составила 1.1 Вт, что соответствует усилению более 26 дБ и совпадает с величиной 4-й степени усиления по слабому сигналу за один проход (черный квадрат на рис.5). Достигнутое усиление сравнимо с таковым в регенеративных усилителях.

Согласно зависимости на рис.4,б, эффективность усиления растет линейно при увеличении мощности накачки. Это означает, что с точки зрения баланса между запасенной энергией, мощностью усиленного сигнала и потерями в усилителе существует возможность дальнейшего роста выходной мощности излучения и эффективности при увеличении мощности накачки. К сожалению, при мощности накачки 64 Вт и отсутствии входного сигнала имеет место порог самовозбуждения усилителя. Возможно, в режиме насыщения усиления самовозбуждение будет отсутствовать, однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

#### 4. Искажения излучения при усилении

Помимо энергетических характеристик, одними из главных параметров усилителя являются поляризационные, фазовые и амплитудные искажения излучения при усилении. Более подробно вопрос о тепловых искажениях излучения в АЭ в виде тонкого стержня рассмотрен в [1]. При настройке и исследовании усилителя существенных тепловых искажений сигнала мы не обнаружили. Поляризационные искажения усиливаемого сигнала были малы и частично компенсировались при обратном проходе излучения [7, 8]. Профиль пучка при усилении практически не изменился, что подтверждает малость фазовых тепловых искажений в усилителе (рис.6). Сильная тепловая линза, возникающая в стержне, компенсировалась при настройках линз Л2 и Л3 (см. рис.3).

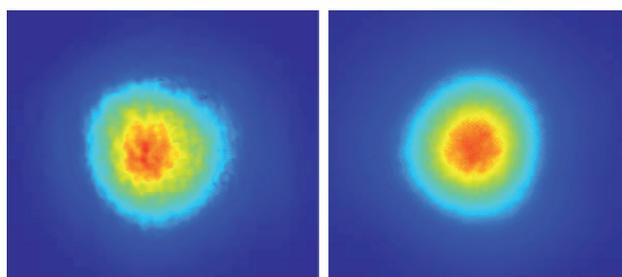


Рис.6. Поперечный профиль усиливаемого (слева) и усиленного (справа) пучков.

При усилении chirпированных лазерных импульсов важно обеспечить не только максимальную энергию в импульсе и удовлетворительный поперечный профиль пучка, но и контролировать временной и спектральный профили усиленного импульса, особенно в режиме насыщенного усиления сигнала. Измерения временного и спектрального профилей при мощности накачки 64 Вт выполнялись фотодиодом ДФД70М с осциллографом Tectronix DPO 7254С и спектрометром Solar ТП соответственно. На входе в усилитель сигнал имеет два пика как во временном, так и в спектральном профилях при общей длительности импульса 1.25 нс и ширине спектра 1.6 нм по уровню 0.5 (рис.7). Второй пик в спектре (рис.7,а) соответствует максимуму сечения усиления, причем сигнал растянут объемными брэгговскими решетками так, что первому спектральному пику отвечают более короткие длины волн с меньшим усилением. Используя такой сигнал, можно уменьшить эффект наката (укорочения переднего фронта) в усиленном импульсе при расстоянии между импульсами, сравнимом с временем жизни верхнего лазерного уровня. Серыми кривыми на рис.7 отображены временной и спектральный профили усиленного импульса. Видно, что ширина усиленного спектра уменьшилась до 1 нм, а длительность импульса – до 0.8 нс. Такой сигнал можно сжать до длительности менее 1 пс. Максимальное усиление достигнуто на задней части импульса. Вероятно, при меньшей частоте следования импульсов (до 10 кГц)

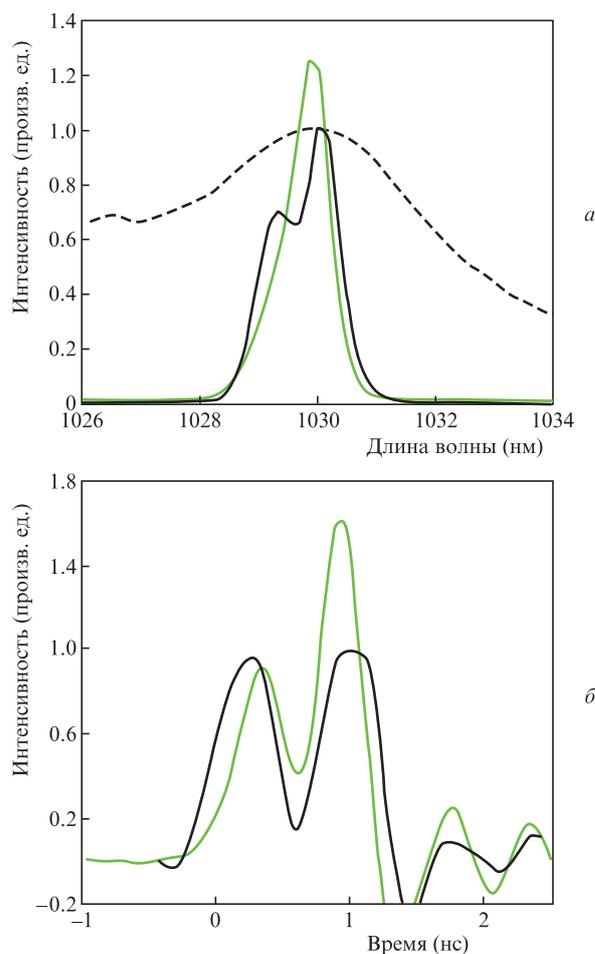


Рис.7. Спектральный (а) и временной (б) профили входного (черные кривые) и усиленного (серые кривые) импульсов при мощности накачки 64 Вт и выходной мощности 8 Вт. Штриховая кривая – нормированное сечение усиления.

можно ожидать «выравнивания» интенсивности в начальной и конечной частях импульса за счет эффекта наката.

## 5. Заключение

Нами представлены первые результаты разработки высокоэффективного усилителя с активным элементом в виде тонкого стержня. Продемонстрировано одновременное сочетание в нем высокой эффективности и большого усиления, сравнимого с достигаемым в регенеративных усилителях. В квантроне с тонким стержневым элементом из Yb:YAG, который изготовлен описанным в [1, 4] способом, получено усиление, близкое к достигнутому в [2, 3, 5]. Выходная мощность усиленного излучения составила 15 Вт при оптической эффективности усиления 18%, что соответствует энергии в импульсе 5 мкДж при частоте их следования 3 МГц. Исследованы особенности усиления chirпированных импульсов и продемонстрировано незначительное сужение спектрального и временно-го профилей излучения при усилении.

Использование нового оригинального метода изготовления квантронов с тонким стержнем позволило применить конусообразный стержень для достижения более эффективной прокачки АЭ и, как следствие, большего усиления. Кроме того, при использовании нового метода изготовления АЭ появляется возможность их создания из других оптических материалов, например из лазерной керамики. Такой подход позволит использовать среды с более широкой полосой усиления (например, керамику Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и создать усилитель импульсов длительностью менее 500 фс.

Основным недостатком разработанного усилителя является его самовозбуждение при большой величине

усиления. Данный эффект может быть ослаблен путем улучшения развязки излучения на обратных проходах. В дальнейшем частота следования импульсов задающей лазерной системы будет снижена до 10 кГц или меньше, что позволит увеличить энергию усиливаемых импульсов до субмиллиджоульного уровня со средней мощностью излучения на выходе в несколько ватт. Такой сигнал может быть сжат обратно до субпикосекундных длительностей такими же брэгговскими решетками или использован для дальнейшего усиления до более высоких энергий.

Работа выполнена при поддержке мега-гранта Правительства РФ № 14.В25.31.0024, выполняемого на базе Института прикладной физики РАН, и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения».

1. Kuznetsov I., Mukhin I., Vadimova O., Palashov O., Ueda K.-I. *Appl. Opt.*, **54** (25), 7747 (2015).
2. Zaouter Y., Martial I., Aubry N., Didierjean J., Hönninger C., Mottay E., Druon F., Georges P., Balembois F. *Opt. Lett.*, **36** (5), 748 (2011).
3. Délen X., Zaouter Y., Martial I., Aubry N., Didierjean J., Hönninger C., Mottay E., Balembois F., Georges P. *Opt. Lett.*, **38** (2), 109 (2013).
4. Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Vadimova O.L., Palashov O.V., Ueda K.-I. *Advanced Solid-State Lasers Congress* (Berlin, 2015); *OSA Techn. Dig.*, AM5A.33 (2015).
5. Délen X., Piehler S., Didierjean J., Aubry N., Voss A., Ahmed M.A., Graf T., Balembois F., Georges P. *Opt. Lett.*, **37** (14), 2898 (2012).
6. Перевезенцев Е.А., Мухин И.Б., Кузнецов И.И., Вадимова О.Л., Палашов О.В. *Квантовая электроника*, **45** (5), 451 (2015).
7. Андреев Н.Ф., Кузнецов С.В., Палашов О.В., Пасманик Г.А., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **19** (9), 862 (1992).
8. Hua R., Wada S., Tashiro H. *Opt. Commun.*, **175** (1-3), 189 (2000).