

# Твердотельный усилитель на основе кристалла Yb:YAG с одномодовой лазерной накачкой на длине волны 920 нм

И.В.Обронов, А.С.Демкин, Д.В.Мясников

*На основе кристалла Yb:YAG с осевой лазерной накачкой на длине волны 920 нм, имеющей одномодовое поперечное распределение лазерного излучения, предложена схема оптического усилителя для ультракоротких импульсов с длиной волны излучения 1030 нм. Продемонстрировано усиление по малому сигналу до 40 дБ за один проход с высоким качеством выходного пучка. Максимальная средняя мощность составила 14 Вт с дифференциальной эффективностью свыше 50%.*

**Ключевые слова:** Yb:YAG, кристаллический стержень, ультракороткие импульсы, одномодовая накачка, неодимовый волоконный лазер, CPA.

## 1. Введение

Благодаря тому, что при взаимодействии оптических ультракоротких импульсов (УКИ) с веществом происходят нелинейные процессы (например, многофотонное поглощение), а также тому, что длительность импульса меньше времени электрон-фононного взаимодействия, УКИ востребованы при точной обработке материалов, в том числе прозрачных [1, 2].

Наиболее надежными и недорогими излучателями для получения и усиления УКИ являются гибридные лазеры. В таких лазерах задающим генератором служит волоконный лазер, работающий в режиме пассивной самосинхронизации мод, излучение которого усиливается в волоконном каскаде. Использование в качестве выходного каскада усиления объемного кристаллического усилителя позволяет существенно увеличить пиковую мощность и энергию импульсов по сравнению с волоконными каскадами. В таких схемах часто используют одно- и двухпроходные объемные усилители на основе кристаллических стержней. Усилители подобного типа позволили получить импульсную энергию свыше 20 мкДж при длительности импульсов 800 фс и средней мощности до 160 Вт [3]. Основными проблемами таких усилителей являются низкая эффективность и значительный нагрев активной среды.

В настоящей работе представлена схема усилителя, использующего усиление лазерных УКИ в цилиндричес-

ком кристалле Yb:YAG в условиях одномодовой (по поперечному распределению) накачки излучением неодимового волоконного лазера на длине волны 920 нм [4]. Одномодовая лазерная накачка позволяет обеспечить большие значения как коэффициента усиления в кристалле, так и параметра качества пучка усиленного лазерного излучения на выходе кристалла Yb:YAG. Кроме того, данный тип накачки позволяет получить высокую эффективность рассматриваемого кристаллического усилителя.

## 2. Результаты экспериментов

На рис.1 изображена оптическая схема экспериментальной установки. Использовался метод усиления chirпированных импульсов (CPA), позволяющий достичь больших энергий лазерного излучения. Усиление лазерных УКИ с длиной волны 1030 нм осуществлялось в кристаллическом стержне Yb:YAG (5 мол.% Yb<sup>3+</sup>) длиной 17 мм и диаметром 1 мм, который размещался в медном радиаторе с водяным охлаждением. Кристаллический стержень накачивался излучением волоконного неодимового лазера мощностью 35 Вт. После усиления оптический импульс сжимался с помощью объемной брэгговской решетки (ОБР-компрессор).

В качестве задающего генератора использовался волоконный лазер с синхронизацией мод, излучающий импульсы длительностью 5 пс с частотой следования

**И.В.Обронов.** ООО НТО «ИРЭ-Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Введенского, 1, корп. 3; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: iobronov@ntoire-polus.ru  
**А.С.Демкин.** ООО НТО «ИРЭ-Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Введенского, 1, корп. 3; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: ademkin@ntoire-polus.ru  
**Д.В.Мясников.** ООО НТО «ИРЭ-Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Введенского, 1, корп. 3

Поступила в редакцию 25 декабря 2017 г., после доработки – 12 февраля 2018 г.

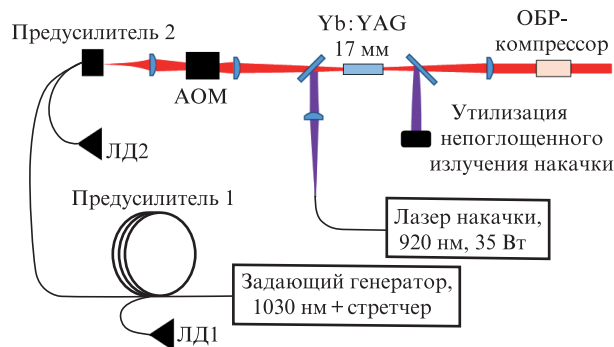


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

14 МГц. Импульсы излучения задающего лазера растягивались до 40 пс с помощью оптического волокна длиной 120 м, затем усиливались в двухкаскадном иттербиевом волоконном усилителе с оптической накачкой лазерными диодами ЛД1 и ЛД2 и фокусировались в кристалл Yb:YAG. Акустооптический модулятор (АОМ), установленный до кристаллического усилителя, использовался для прореживания частоты следования импульсов задающего генератора до 2 МГц. Параметры импульсов сигнала на входе в кристалл Yb:YAG приведены ниже.

Средняя мощность (мВт) . . . . .	0.5–1350
Длина волны (нм) . . . . .	1030
Частота следования (МГц) . . . . .	2
Ширина спектра (нм) . . . . .	3
Длительность (пс) . . . . .	40

В результате экспериментов были получены импульсы излучения со средней мощностью свыше 14 Вт на длине волны 1030 нм при средней мощности входных импульсов 1.4 Вт с дифференциальной эффективностью  $\eta$  по поглощенной накачке более 50%. Достигнутая выходная мощность была ограничена уровнем доступной мощности накачки. В случае, когда усилитель работал в режиме усиления малого сигнала, входная мощность  $P_{in} = 0.5$  мВт, средняя выходная мощность составляла 5 Вт (рис.2) с коэффициентом усиления до 40 дБ (рис.3), который, согласно литературным данным, является рекордным

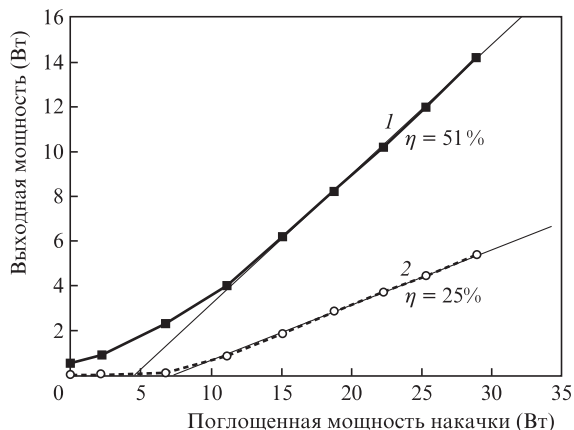


Рис.2. Измеренные зависимости средней выходной мощности излучения от поглощенной мощности накачки при входной средней мощности  $P_{in} = 1350$  (1) и 0.5 мВт (2).

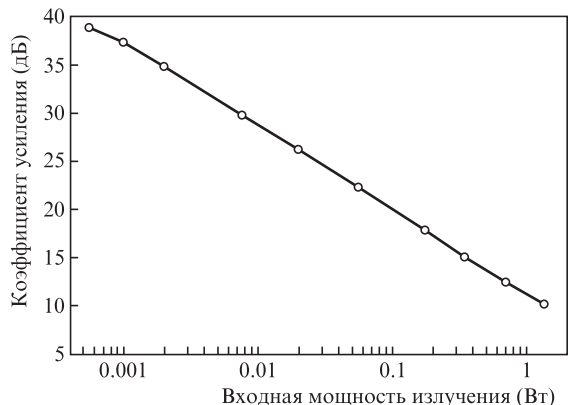


Рис.3. Зависимость коэффициента усиления в кристалле Yb:YAG от средней входной мощности излучения.

для однопроходной схемы усилителей на кристаллических стержнях Yb:YAG. После усиления была измерена сжимаемость импульса с использованием ОБР-компрессора. Длительность сжатого импульса составила 980 фс, что довольно близко к теоретическим оценкам для спектрально-ограниченного импульса.

При максимальной выходной средней мощности параметр качества пучка  $M^2 = 1.01$ , а в режиме усиления малого сигнала  $M^2 = 1.3$ . Ухудшение качества выходного пучка при большом усилении может быть вызвано «инверсионной» линзой, роль которой возрастает по мере увеличения коэффициента усиления. Эффект «инверсионной» линзы связан с изменением показателя преломления кристалла в зависимости от концентрации ионов иттербия  $Yb^{3+}$ , находящихся в возбужденном состоянии. Этот эффект был исследован теоретически и экспериментально в работе [5]. Для используемого в нашей работе кристаллического стержня с концентрацией активных ионов  $Yb^{3+}$  5 мол.% и при инверсии населенности лазерного уровня (терм  ${}^2F_{5/2}$ ) порядка 60% нелинейная добавка к собственному коэффициенту преломления среды равна приблизительно  $10^{-4}$  [5]. С другой стороны, изменение показателя преломления среды, вызванное эффектом термолинзы, можно оценить следующим образом. Известно, что термооптический коэффициент в кристалле Yb:YAG равен  $8.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [6]. Рассчитанный нами температурный градиент в кристалле составил около  $15^\circ\text{C}$ , поэтому добавка к коэффициенту преломления от эффекта «инверсионной» линзы будет сравнима с добавкой, вызванной эффектом термолинзы, что может приводить к искажению выходных оптических характеристик усилителя.

Параметр качества пучка измерялся с помощью прибора DataRay BeamMap2, перетяжка лазерного излучения в котором формировалась оптической линзой с фокусным расстоянием 100 мм, установленной на расстоянии 150 мм от выходного торца кристалла. Кроме того, измерялся сдвиг перетяжки при различных мощностях входного сигнала излучения. Большой интерес с точки зрения использования кристаллического усилителя в оптических схемах представляет измерение сдвига перетяжки пучка в зависимости от коэффициента усиления в кристалле. Измеренная нами зависимость сдвига перетяжки лазерного излучения с длиной волны 1030 нм (рис.4) имела ярко выраженный экстремум. Мы полага-

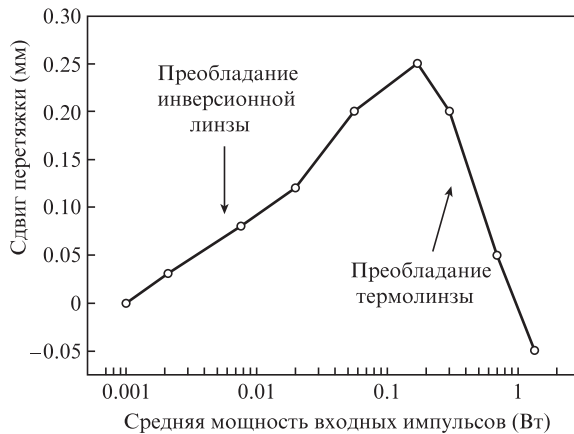


Рис.4. Экспериментально измеренная зависимость положения перетяжки усиленного лазерного излучения от средней мощности входных импульсов после фокусировки линзой. Мощность лазера накачки 35 Вт.

ем, что при больших (свыше 25 дБ) коэффициентах усиления в кристалле Yb:YAG сдвиг перетяжки пучка обусловлен преобладанием эффекта «инверсионной» линзы, а при более низких коэффициентах усиления – доминированием эффекта термолинзы.

Итак, впервые представлена схема одномодовой накачки с длиной волны 920 нм стержневых усилителей на кристаллах Yb:YAG. Максимальное значение средней выходной мощности импульсов на длине волны 1030 нм составило 14 Вт при дифференциальной эффективности более 50%. Продемонстрирована возможность примене-

ния данной схемы в качестве усилителя малых сигналов, что позволило получить максимальный однопроходной коэффициент усиления малого сигнала до 40 дБ.

1. Albelo J.A. et al. *Intern. Soc. Opt. Photon.*, **6871**, 687122 (2008).
2. Sugioka K. *Nanophotonics*, **6** (2), 393 (2017).
3. Markovic V. et al. *Opt. Express*, **23** (20), 25883 (2015).
4. Gapontsev V.P., Zaytsev I., Vyatkin M. High Power Neodymium Fiber Lasers and Amplifiers. Patent USA No. 9716365, 2017.
5. Moncorgé R. et al. *Opt. Commun.*, **281** (9), 2526 (2008).
6. Furuse H., Yasuhara R., Hiraga K. *Opt. Mater. Express*, **4** (9), 1794 (2014).