

# Силовой усилитель на неодимовом стекле импульсно-периодического лазера

А.В.Виноградов, В.Е.Гаганов, С.Г.Гаранин, Н.В.Жидков, В.А.Кротов, С.П.Мартыненко, Е.В.Поздняков, И.И.Соломатин

*Разработана конструкция усилителя на неодимовом стекле с зигзагообразным распространением лазерного пучка по активной среде и накачкой лазерными диодами, предназначенного для работы в составе импульсно-периодического лазера. Испытана конструкция усилителя с апертурой  $20 \times 25$  мм и длиной активной среды  $\sim 40$  см. Энергия излучения накачки достигает 140 Дж на длине волны 806 нм при длительности накачки 550 мкс. В экспериментах определены энергетические параметры усилителя: коэффициент ненасыщенного усиления на активной длине усилителя  $\sim 3.2$ , линейный коэффициент усиления  $\sim 0.031 \text{ см}^{-1}$  при неравномерности распределения по апертуре не более 15%, запасаемая энергия 0.16–0.21 Дж/см<sup>3</sup>. Искажения волнового фронта при зигзагообразном распространении лазерного пучка в активном элементе усилителя не превышали  $0.4\lambda$  ( $\lambda = 0.63$  мкм – длина волны зондирующего излучения).*

**Ключевые слова:** неодимовый лазер, фосфатное стекло, накачка лазерными диодами, зигзагообразное распространение лазерного пучка, линейный коэффициент усиления, запасенная энергия, оптическое качество активных элементов.

## 1. Введение

Значительный прогресс, достигнутый в последние годы в физике твердотельных лазеров, связан с разработкой и исследованием нового поколения лазеров – твердотельных лазеров с оптической накачкой лазерными диодами [1–8].

Преимущества диодной накачки перед ламповой – узкая полоса излучения в энергетически выгодной полосе поглощения активных сред и высокий (до 50%) КПД преобразования электрической энергии в световую – позволяют существенно повысить эффективность лазеров и облегчить тепловые режимы работы твердотельных активных сред, что особенно важно при создании импульсно-периодических лазеров.

Развитие этого направления сдерживается, в основном, высокой стоимостью диодной накачки, а также низкими удельными энергетическими параметрами. Однако существенный прогресс в технологии производства диодных лазеров с интегрированной многоэлементной линейной и двумерной матричной структурами, достигнутый в последнее время, вплотную приблизил диодную накачку к традиционной ламповой по мощностным характеристикам. Это продвижение в технологии позволяет рассматривать возможность создания мощных, наносекундного диапазона длительности импульсно-периодических твердотельных лазеров с выходной энергией  $\sim 100$  Дж, а в перспективе и 1 кДж, при частоте следования импульсов порядка десятков герц [2, 4, 5].

В настоящей работе представлены результаты исследований параметров усилителя на неодимовом стекле с

накачкой лазерными диодами, предназначенного для работы в составе импульсно-периодического лазера с частотой следования импульсов порядка единиц герц.

## 2. Конструкция усилителя

В качестве активной среды усилителя было выбрано легированное неодимом фосфатное стекло КГСС-0180 [9]. Концентрация ионов неодима составляла  $1.4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Привлекательность этой среды заключается в том, что она обладает подходящим сечением усиления, что позволяет запасать в мощных силовых усилителях энергию высокого уровня. Вполне приемлемо и время жизни возбужденного состояния лазерного перехода. По проведенным нами измерениям для выбранного стекла оно составляет  $\sim 370$  мкс. Не вызывает также затруднений изготовление активных элементов достаточно больших размеров.

Основной недостаток, характерный для активных сред на основе стекол, – их малая теплопроводность. В импульсно-периодическом режиме это приводит к образованию термооптических искажений, которые ухудшают направленность усиливаемого излучения. С целью исключения этого в разработанной конструкции усилителя применен зигзагообразный способ распространения лазерного пучка по активной среде с отражением от боковых граней [2, 4].

Активный элемент усилителя имеет в поперечном сечении форму прямоугольника  $25 \times 32$  мм, длина элемента составляет 370 мм. Боковые грани шириной 32 мм отполированы. Сквозь них осуществляется накачка и с их помощью при выполнении условия полного внутреннего отражения реализуется зигзагообразное распространение лазерного пучка. Рабочая апертура усилителя составляет  $20 \times 25$  мм, длина накачиваемой части – 35 см. На рис. 1 представлено поперечное сечение усилителя. Накачка среды осуществляется объединенными в четыре блока сборками лазерных диодов СЛМ-7-4 (НПО «Инжект», Саратов). Длина волны излучения накачки равна 806 нм, суммарная энергия достигает 140 Дж при длительности

А.В.Виноградов, В.Е.Гаганов, С.Г.Гаранин, Н.В.Жидков, В.А.Кротов, С.П.Мартыненко, Е.В.Поздняков, И.И.Соломатин. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Институт лазерно-физических исследований, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: krotov@iskra5.vniief.ru

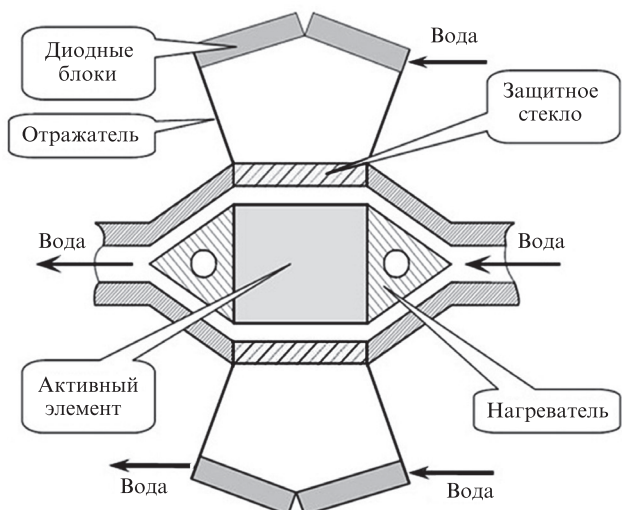


Рис.1. Поперечное сечение усилителя.

импульса до 550 мкс. Водяное охлаждение усилителя осуществляется двумя независимыми контурами: контуром охлаждения активного элемента и контуром охлаждения системы накачки. Для компенсации оптических искажений в направлении, перпендикулярном плоскости зигзага светового пучка, в конструкцию введены термокомпенсаторы (на рис.1 – нагреватель), предназначенные для уменьшения градиентов термооптических искажений в этом направлении.

### 3. Оптическое качество активного элемента

Ключевым моментом при создании усилителя с зигзагообразным распространением лазерного пучка по объему среды является качество обработки боковых поверхностей элемента, с помощью которых реализуется режим зигзага – многократные (4–8 раз) отражения лазерного пучка, распространяющегося в активной среде усилителя.

Активный элемент имеет «невыгодные» габаритные размеры, т. е. соотношение длины и поперечного сечения. Технология обработки таких элементов была разработана в ОАО ЛЗОС (Лыткарино), и сейчас достигнут такой уровень качества, при котором волновой фронт лазерного пучка, зигзагообразно распространяющегося по «холодному» активному элементу, искажается не более чем на 0.4λ (λ = 0.63 мкм – длина волны зондирующего излучения). На рис.2 представлены результаты тестирования качества обработки, проведенного с помощью интерферометрической методики.

### 4. Энергетические характеристики лазерного усилителя

Энергетические характеристики усилителя определялись путем измерения коэффициента усиления в режиме слабого сигнала. В первой серии экспериментов регистрировался коэффициент усиления в центральной части рабочей апертуры при вариации длительности накачки, во второй серии осуществлялась регистрация распределения коэффициента усиления по рабочей апертуре. В обоих случаях использовалась классическая методика зондирования активной среды (схема стенда представлена на рис.3).

Усилитель зондировался излучением генератора на кристалле YLF, генерирующего одиночный лазерный им-

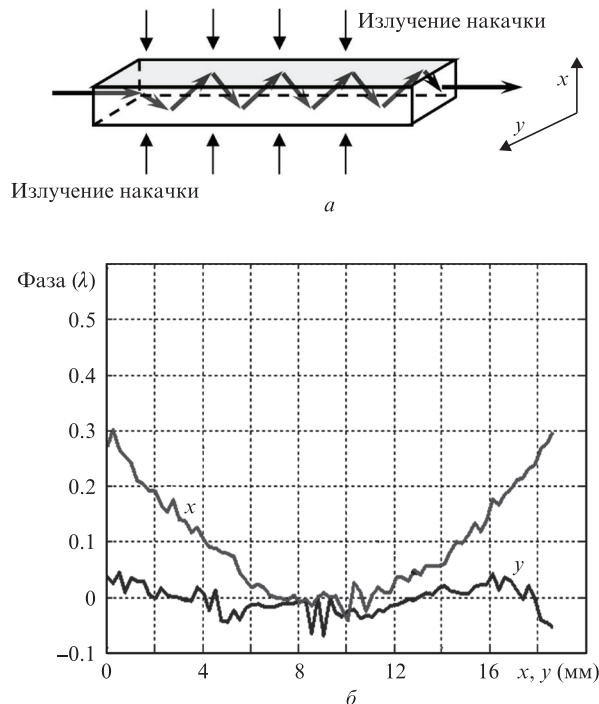


Рис.2. Схема распространения лазерного пучка по активному элементу (а) и фазовые искажения зондирующего лазерного пучка на длине волны λ = 0.63 мкм (б) (погрешность измерений 0.02λ).

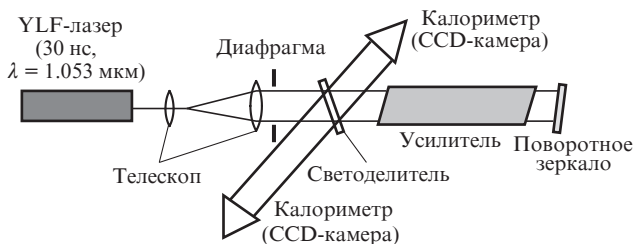


Рис.3. Оптическая схема стенда для измерения коэффициента усиления. Использовалась круглая диафрагма Ø5 мм либо квадратная 20 × 20 мм.

пульс с длиной волны 1.053 мкм, длительностью 30 нс и плотностью энергии ~0.05 Дж/см<sup>2</sup>. Зондирование проводилось по двухпроходной схеме. В предварительных экспериментах регистрировалось пропускание тракта в отсутствие накачки усилителя, которое в дальнейшем учитывалось. Активная среда усилителя накачивалась световым импульсом постоянной мощности. Суммарная энергия накачки варьировалась путем изменения ее длительности; при длительности накачки 550 мкс она достигала 140 Дж.

На рис.4 приведены результаты измерения коэффициента усиления *K* на один проход при вариации длительности накачки. Здесь же представлена аналитическая зависимость изменения коэффициента усиления активной среды при постоянной мощности накачки и конечном времени релаксации верхнего лазерного уровня:

$$K \sim W\tau(1 - \exp[-t/\tau]),$$

где *t* – длительность накачки; τ – время релаксации (370 мкс); *W* – мощность накачки.

Распределение запасенной энергии по апертуре усилителя регистрировалось на том же экспериментальном

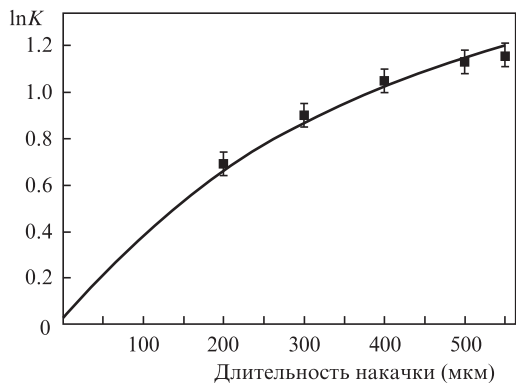


Рис.4. Коэффициент усиления  $K$  усилителя на один проход при вариации длительности накачки; точки – результаты эксперимента, кривая – аналитическая зависимость.

стенде (см. рис.3), для чего в схему была внесены изменения – calorimeters заменены на CCD-камеры, а апертура регистрации увеличена до  $20 \times 20$  мм. Эксперименты проводились при длительности накачки 300 мкс. Предельная длительность накачки составляла 550 мкс и была ограничена параметрами применяемых лазерных диодов. Для этой длительности накачки распределение запасаемой энергии вычислялось путем экстраполяции экспериментальных данных с помощью зависимости, приведенной на рис.4. Результаты представлены на рис.5 и 6, где даны распределения линейного коэффициента усиления, пропорционального запасаемой энергии: на рис.5 приведено двумерное распределение линейного коэффициента усиления в виде изоуровней с пятью градациями величины линейного коэффициента усиления, рис.6 иллюстрирует распределение линейного коэффициента усиления в центральном горизонтальном и вертикальном сечениях апертуры.

Таким образом, нами представлены результаты исследований разработанного варианта лазерного усилителя на неодимовом стекле с накачкой лазерными диодами, проведенных в режиме одиночных импульсов. Максимальный зарегистрированный коэффициент ненасыщенного усиления составил  $\sim 3.2$ , линейный коэффициент усиления – около  $0.031 \text{ см}^{-1}$ . Неравномерность распределения линейного коэффициента усиления по апертуре не превышала 15%.

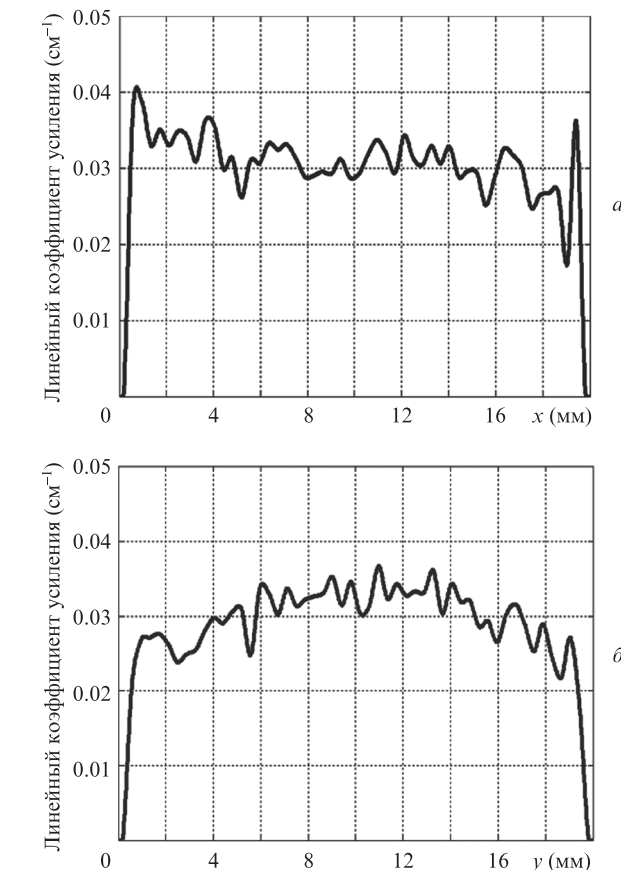


Рис.6. Распределения линейного коэффициента усиления в центральных взаимно-перпендикулярных сечениях апертуры усилителя – по координате  $x$  (а) и по координате  $y$  (б).

Согласно оценкам, при сечении усиления  $(3.2 \pm 0.4) \times 10^{-20} \text{ см}^2$  [7] плотность запасаемой энергии составляет  $0.16-0.21 \text{ Дж/см}^3$ .

Согласно оценкам, при сечении усиления  $(3.2 \pm 0.4) \times 10^{-20} \text{ см}^2$  [7] плотность запасаемой энергии составляет  $0.16-0.21 \text{ Дж/см}^3$ .

1. Fan T.Y. *Lincoln Lab. J.*, **3** (3), 413 (1990).
2. Kanabe T., Kawashima T., et al. *Ann. Progr. Report, ILE Osaka University* (Osaka, 2000. p. 117).
3. Кравцов Н.В. *Квантовая электроника*, **31** (8), 661 (2001).
4. Ikegawa T., Kawashima T., et al. *Proc. Int. Conf. IFSA-2005* (France, 2005, p. 641).
5. Kawashima T., Ikegawa T., et al. *Proc. Int. Conf. IFSA-2005* (France, 2005, p. 615).
6. Горбунков М.В., Коняшкин А.В., Кострюков П.В. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 3 (2005).
7. Богатов А.П., Дракин А.Е., Микаелян Г.Т. и др. *Квантовая электроника*, **36** (4), 302 (2006).
8. Dergachev A., Flint G.H., et al. *IEEE J. Sel. Topic Quantum Electron.*, **13** (3), 647 (2007).
9. Арбузов В.И., Волынкин В.М., Лунтер С.Г. и др. *Оптич. журн.*, **70** (5), 68 (2003).

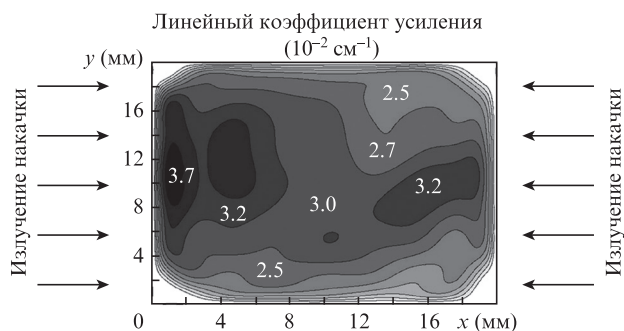


Рис.5. Распределение линейного коэффициента усиления по апертуре усилителя.