

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ МОНОИМПУЛЬСНОГО
Er:YLF-ЛАЗЕРА В УСЛОВИЯХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ
КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

В.В. Назаров, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов, Н.А. Федоров

Разработана модель твердотельного лазера с продольной диодной накачкой, позволяющая исследовать характеристики излучения Er:YLF-лазера в условиях пространственной неоднородности коэффициента усиления. Исследована зависимость энергетических и пространственных характеристик излучения от пространственных параметров пучка накачки, а также от концентрации активатора в активном элементе. Приведена зависимость энергии моноимпульса от соотношения радиуса основной моды и радиуса пучка накачки.

Ключевые слова: устойчивый резонатор, продольная диодная накачка, неоднородность распределения коэффициента усиления, перетяжка пучка, параметр качества пучка.

Введение

В последнее время благодаря разработке эффективных мощных диодов возрос интерес к лазерам с диодной накачкой [1]. Лазеры с продольной диодной накачкой обеспечивают высокую эффективность накачки и более высокие пространственные характеристики излучения генерации в сравнении с лазерами с поперечной накачкой, что делает их перспективными для медицинских приложений. Одним из наиболее важных факторов, определяющих эффективность лазерной генерации, а также выходную мощность, является проблема пространственного перекрытия излучения накачки и пучка генерации, что определяется модовым составом генерируемого излучения. Влияние размеров пучков накачки и лазерного излучения на величину порога и эффективность лазерной генерации исследовано в ряде работ [2–4], в большинстве которых рассматривается усредненный по объему активного элемента размер пучка накачки. Несмотря на то, что данный подход дает возможность получить простые аналитические зависимости для проведения оптимизации, влияние таких параметров, как расходимость и положение перетяжки пучка накачки в объеме активного элемента, на энергетические и пространственные характеристики лазерной генерации не может быть учтено в рамках таких простых моделей. В ряде работ определение интеграла перекрытия пучков накачки и излучения генерации рассматривается при помощи численных методик [5–6], в которых учитывается генерация исключительно вблизи порога.

В настоящей работе приведены результаты исследования моноимпульсного Er:YLF-лазера с учетом радиальной и продольной неоднородностей коэффициента усиления активной среды.

Взаимодействие излучения накачки с активным элементом

Для учета влияния пространственной неоднородности коэффициента усиления на энергетические и пространственные характеристики излучения была разработана математическая модель накачки, каустика пучка накачки в котором подчиняется линейному закону (рис. 1). Такая форма каустики позволяет достаточно простым способом промоделировать накачку с произвольным значением параметра качества пучка M^2 .

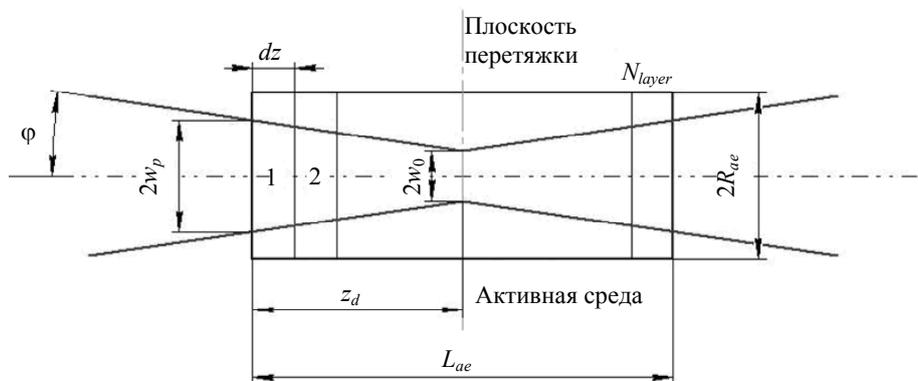


Рис. 1. Модель взаимодействия излучения пучка накачки с активной средой

В модели рассматривался активный элемент лазера со следующими геометрическими параметрами: длина активной среды $L_{ae} = 50$ мм, радиус активного элемента $R_{ae} = 1$ мм. Накачка осуществлялась

гауссовым пучком с заданным радиусом на входе в активную среду w_p , радиусом в перетяжке w_0 и положением самой перетяжки z_d . Радиус гауссова пучка определялся по уровню e^{-2} от максимального значения интенсивности (рис. 2).

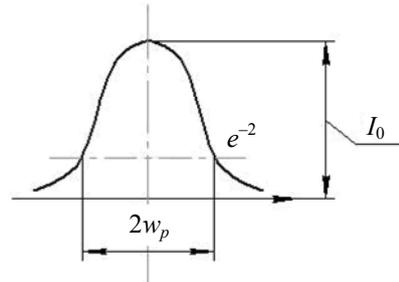


Рис. 2. Определение параметров гауссова пучка

В рамках модели активная среда разбивалась на слои N_{layer} толщиной dz , в которых по отдельности решалась задача взаимодействия импульса излучения накачки с резонансно поглощающей средой. Параметры излучения накачки (интенсивность излучения и радиус пучка накачки), полученные после прохождения первого слоя, использовались в качестве исходных данных при расчете взаимодействия со вторым слоем, и т.д. Математически подобная задача сводится к решению нелинейной системы уравнений в частных производных для функций $I(z, t)$ и $N(z, t)$:

$$\frac{\partial I_p(z, t)}{\partial z} = -(\sigma_{abs} \cdot N_1 - \sigma_{em} \cdot N_2) \cdot I_p - b \cdot I_p$$

$$\frac{\partial N_2(z, t)}{\partial t} = (\sigma_{abs} \cdot N_1 - \sigma_{em} \cdot N_2) \cdot I_p - \frac{N_2}{T_1} - 2 \cdot \gamma \cdot N_2^2,$$

$$N_2 = N_s - N_1$$

где I – интенсивность излучения накачки; N_1, N_2 – населенность нижнего и верхнего уровней активной среды; N_s – концентрация активных центров; $\sigma_{abs}, \sigma_{em}$ – сечения поглощения и вынужденного излучения для излучения накачки; b – коэффициент нерезонансных потерь; T_1 – время жизни верхнего уровня; γ – коэффициент ап-конверсии.

Длительность импульса накачки τ в расчетах составляла 2 мс; параметры активной среды, используемые для вычислений, представлены в таблице, в которой приведены также коэффициенты ап-конверсии по данным [7].

Длина волны накачки λ_p , мкм		0,97
Сечения эмиссии и поглощения на длине волны накачки, см ²	σ_{em}	$0,34 \cdot 10^{-20}$
	σ_{abs}	$1,1 \cdot 10^{-20}$
Время жизни верхнего лазерного уровня T_1 , с		$4 \cdot 10^{-3}$
Модельные коэффициенты ап-конверсии γ , см ³ /с		$1 \cdot 10^{-17}$ [6]
Коэффициент нерезонансных потерь b , см ⁻¹		$1 \cdot 10^{-3}$
Длина волны генерации λ_{gen} , мкм		2,81

Таблица. Параметры кристалла Er:YLF при $T = 300$ К

Исследование энергетических характеристик моноимпульсного режима работы Er:YLF-лазера

Для расчета пространственно-временной структуры поля используется модель лазерного устойчивого резонатора, позволяющая исследовать процесс формирования поля лазерного излучения с учетом дифракции и усиления активной среды [8]. Моделирование проводилось для следующих геометрических параметров резонатора лазера: радиус апертуры $a = 1$ мм; база резонатора $L_{base} = 0,1$ м; глухое зеркало – плоское (кривизна глухого зеркала $R_1 = 0$ м⁻¹), коэффициент отражения выходного зеркала $R_0 = 0,95$; число Френеля $F = 3,6$; кривизна выходного зеркала R_2 была изменяемым параметром с целью управления радиусом основной моды резонатора лазера.

В ходе моделирования была построена зависимость энергии E моноимпульса от положения перетяжки пучка накачки в объеме активного элемента (рис. 3). Зависимости были получены для следующих

параметров пучка накачки и кривизны выходного зеркала: радиус пучка накачки $w_p = 0,8$ мм, радиус перетяжки $w_0 = 0,6$ мм, кривизна выходного зеркала $R_2 = 0,6 \text{ м}^{-1}$.

Как видно из представленных графиков, для концентрации активатора больше 1% смещение перетяжки вглубь активного элемента приводит к существенному увеличению энергии моноимпульса, в то же время при концентрации 0,3% увеличение энергии незначительно. При увеличении концентрации больше 1% оптимальное положение перетяжки пучка накачки, при котором наблюдается максимальная энергия при данной концентрации, начинает смещаться к левому краю активного элемента за счет того, что при больших концентрациях область усиления ограничена первыми слоями активного элемента.

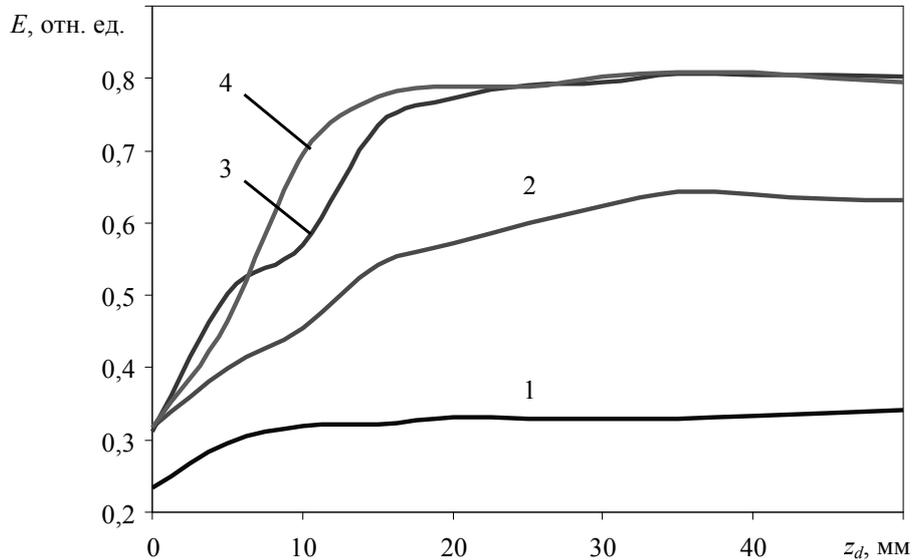


Рис. 3. Зависимость энергии моноимпульса от положения перетяжки пучка накачки при концентрации активатора 0,3%, 1%, 1,5% и 2% (кривые 1–4 соответственно)

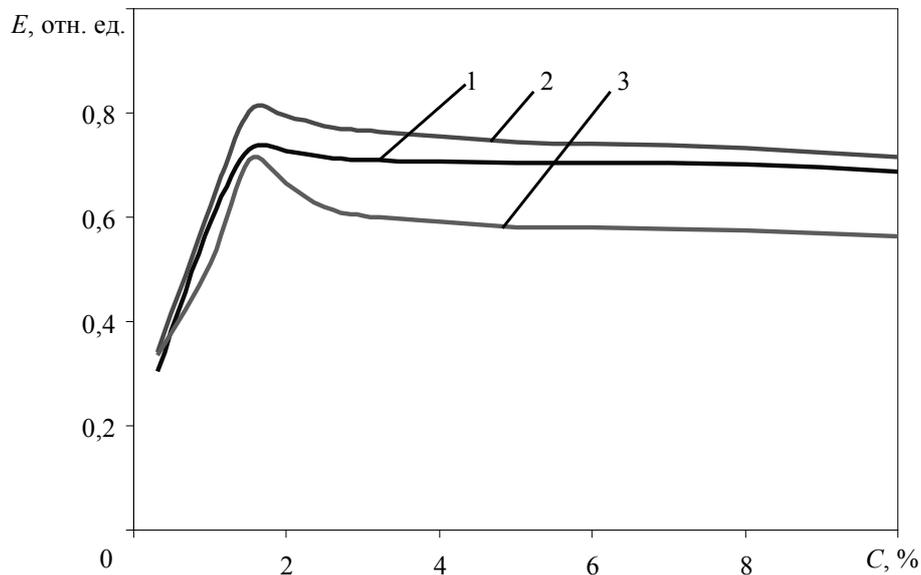


Рис. 4. Зависимость энергии моноимпульса от концентрации активатора при кривизне выходного зеркала $0,4 \text{ м}^{-1}$, $0,6 \text{ м}^{-1}$ и $0,9 \text{ м}^{-1}$ (кривые 1–3 соответственно)

В ходе дальнейшего моделирования была исследована зависимость энергии моноимпульса от концентрации активатора при фокусировке пучка ближе к выходному торцу активного элемента ($z_d = 50$ мм) и радиусах пучка накачки на входе в активный элемент и в плоскости перетяжки 0,8 мм и 0,6 мм соответственно (рис. 4). Моделирование проводилось при различных значениях кривизны выходного зеркала R_2 .

При указанных геометрических параметрах пучка накачки максимальная энергия моноимпульса была достигнута для концентрации активатора 1,5%. Для данной концентрации характерна наиболее рав-

номерная прокачка активного элемента вдоль продольной оси, что приводит к усилению излучения во всех слоях. Также была определена оптимальная кривизна выходного зеркала, которая составила $0,6 \text{ м}^{-1}$. Такая конфигурация резонатора позволяет получить максимальную энергию моноимпульса для разных концентраций и параметр качества пучка M^2 , близкий к единице. Уменьшение кривизны выходного зеркала приводит к уменьшению энергии моноимпульса при неизменном качестве пучка, а увеличение – также к уменьшению энергии, но при существенном снижении качества пучка ($M^2 > 2$) за счет генерации дополнительных поперечных мод.

Для более тщательного исследования влияния кривизны выходного зеркала (радиуса основной моды резонатора) на энергию моноимпульса была построена зависимость энергии моноимпульса от соотношения радиуса основной моды w_{00} и радиуса пучка накачки для различных значений концентраций активатора (рис. 5). Моделирование проводилось при следующих параметрах пучка накачки: $z_d = 50 \text{ мм}$, $w_p = 0,8 \text{ мм}$, $w_0 = 0,6 \text{ мм}$.

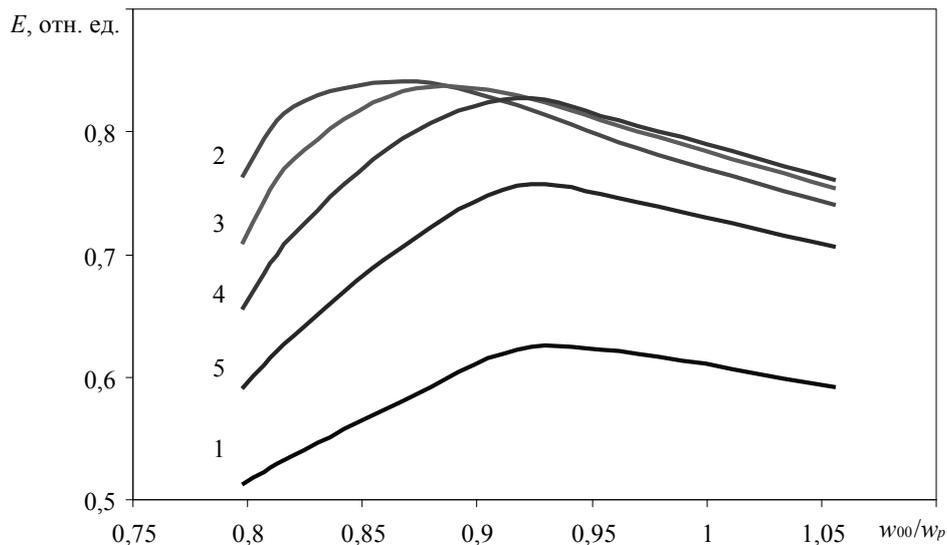


Рис. 5. Зависимость энергии моноимпульса от соотношения радиуса основной моды и радиуса пучка накачки при концентрации активатора 1%, 1,5%, 2%, 3% и 4% (кривые 1–5 соответственно)

Как видно из полученных зависимостей, при увеличении концентрации активатора ($C > 1,5\%$) оптимальное соотношение радиуса основной моды и радиуса пучка накачки, при котором достигается максимум энергии моноимпульса, смещается в сторону увеличения радиуса основной моды. Данный эффект можно объяснить тем, что при больших концентрациях активатора усиление излучения генерации происходит за счет более эффективного снятия накопленной инверсии на периферии активного элемента.

Заключение

Разработана математическая модель твердотельного моноимпульсного Er:YLF-лазера с продольной диодной накачкой, которая позволяет исследовать влияние пространственной неоднородности коэффициента усиления на пространственные и энергетические параметры излучения генерации. Разработанная модель накачки позволяет достаточно простым способом описать пучок накачки с произвольным значением M^2 .

С помощью разработанной модели были исследованы энергетические зависимости моноимпульса лазера от положения перетяжки пучка накачки в активном элементе. Найдена оптимальная концентрация активатора и оптимальное соотношение радиусов основной моды и пучка накачки для достижения максимальной энергии моноимпульса. Представлена зависимость энергии моноимпульса от соотношения радиуса основной моды и радиуса пучка накачки для различных значений активатора.

Работа выполнена в рамках НИР № 411406 (номер государственной регистрации 01 201261810 от 23.05.2012), финансируемой из централизованных средств НИУ ИТМО.

Литература

1. Иночкин М.В., Назаров В.В., Сачков Д.Ю., Сидорова О.П., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю. Особенности многочастотной генерации излучения эрбиевых лазеров // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 5. – С. 79–85.
2. Risk W.P. Modeling of longitudinally pumped solid state lasers exhibiting reabsorption losses // J. Opt. Soc. Am. B. – 1988. – V. 5. – P. 1412–1423.

3. Fan T.Y., Sanchez A. Pump source requirements for end pumped lasers // IEEE J. of Quantum Electronics (QE). – 1990. – V. 26. – № 2. – P. 311–316.
4. Laporta P., Brussard M. Design criteria for mode size optimization in diode pumped solid state lasers // IEEE J. of Quantum Electronics (QE). – 1991. – V. 27. – № 10. – P. 2319–2326.
5. Pfister C., Albers P., Weber H.P. Influence of spatial mode matching in end-pumped solid state lasers // Appl. Phys. B. – 1992. – V. 54. – № 1. – P. 83–88.
6. Chen Y.F., Liao T.S., Kao C.F. et al. Optimization of fiber coupled laser diode end pumped lasers // IEEE J. of Quantum Electronics (QE). – 1996. – V. 32. – № 11. – P. 2010–2016.
7. Ткачук А.М., Разумова И.К., Мирзаева А.А., Малышев А.В., Гапонцев В.П. Ур-конверсия и заселение возбужденных уровней иона эрбия в кристаллах LiY1-xErxF4 ($x=0.003-1$) при непрерывной накачке излучением InGaAs-лазерных диодов // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 92. – № 1. – С. 73–88.
8. Назаров В.В., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю., Федоров Н.А. Исследования пространственных характеристик излучения твердотельных лазеров в условиях продольной диодной накачки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С. 34–39.

- Назаров Вячеслав Валерьевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, lab255@grv.ifmo.ru
- Хлопонин Леонид Викторович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, l_khloponin@yahoo.com
- Храмов Валерий Юрьевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, khramov@grv.ifmo.ru
- Федоров Никита Анатольевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, nikifedorov@mail.ru