

Активные элементы в виде тонких стержней квадратного сечения для многоканальных лазерных усилителей

И.И.Кузнецов

Проведено исследование термонаведенных фазовых искажений излучения в активных элементах в виде тонкого стержня квадратного сечения и показано отсутствие aberrаций и ухудшения качества пучка, что позволяет применять такие стержни наравне со стержнями круглого сечения, но с использованием значительно более технологичных подходов при их изготовлении и монтаже в систему охлаждения. Предложена концепция компактного и надежного многоканального твердотельного усилителя на основе таких активных элементов, позволяющая использовать в качестве задающей системы многоканальный волоконный лазер.

Ключевые слова: многоканальный лазерный усилитель, когерентное сложение каналов, лазеры высокой средней и пиковой мощности, Yb:YAG-лазеры с диодной накачкой, тепловые эффекты в твердотельных лазерах.

1. Введение

Одной из последних тенденций развития физики высоких плотностей энергии и экстремальных световых полей является применение лазеров, обладающих, помимо высокой пиковой мощности, высокой средней мощностью. Использование таких лазеров позволяет создавать источники рентгеновского и терагерцевого излучения высокой средней яркости, которые открывают новые возможности для спектроскопии и визуализации [1]. Они могут применяться в диэлектрических [2] и плазменных [3] лазерных ускорителях для повышения средней яркости электронного пучка, а также в качестве драйверов для фотокатодов [4] или источников на основе комптоновского рассеяния [5]. Для различных приложений требуются лазеры с различной пиковой мощностью, но повышенные средней мощности актуально всегда.

В каждом диапазоне пиковых мощностей или энергий импульсов достижение высокой средней мощности излучения является отдельной задачей, требующей специальных принципов и подходов при построении лазерной системы. В области небольших энергий (менее 1 мДж) наиболее надежным и практичным подходом является использование волоконных лазеров, способных работать при очень высокой средней мощности с сохранением идеального качества пучка, но ограниченных по пиковой мощности нелинейными эффектами в волокне. Для достижения миллиджоульного уровня энергии волокна с большим диаметром моды применяются совместно со схемами усиления chirпированных импульсов и разделенных импульсов. Для перехода в 10-мДж диапазон энергий служат многоканальные волоконные системы с когерентным сложением каналов [6]. Существуют проекты, на-

правленные на достижение мультиджоульного уровня энергии со сложением 10000 каналов [7], однако практичность и надежность данного подхода вызывает сомнения.

Альтернативным способом повышения энергии импульсов является использование так называемой гибридной схемы лазера с волоконной задающей частью и твердотельным оконечным усилителем. Наиболее подходящим при этом является усилитель на основе тонкого стержня или «монокристаллического волокна» из кристалла Yb:YAG [8]. Он обладает большим коэффициентом усиления, что позволяет использовать простые одно- и двухпроходные оптические схемы, способен работать при достаточно большой средней мощности [9] и при значительно большей пиковой мощности и энергии импульсов, чем волокна [10]. Благодаря своей простоте и компактности такой подход получил широкое распространение в лазерах для промышленности. Применение данного подхода в многоканальной лазерной системе с когерентным сложением позволило бы достигать значительно большей энергии импульсов, чем в волоконном лазере с аналогичным числом каналов. Ключевой задачей здесь является создание компактного и надежного многоканального твердотельного усилителя.

В рамках настоящего исследования разработана концепция многоканального твердотельного усилителя на основе тонких Yb:YAG-стержней квадратного сечения, применение которых может быть более технологичным, чем стержней круглого сечения. Предложен вариант компоновки таких стержней и их монтажа в систему охлаждения. Проведено исследование особенностей тепловых эффектов в таких стержнях.

2. Тепловые эффекты в тонком стержне квадратного сечения

Ключевым вопросом, возникающим при использовании активного элемента (АЭ) квадратного сечения, является аксиальная асимметрия системы охлаждения, которая может приводить к возникновению aberrаций тепловой линзы, включая астигматизм или aberrации более

И.И.Кузнецов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: kuznetsov@ipfran.ru

высокого порядка. Для экспериментального исследования нами разработан лазерный квантрон на тонком стержне квадратного сечения. АЭ был изготовлен из кристалла Yb:YAG с уровнем легирования 1.5 ат.% в форме прямоугольного параллелепипеда 1 × 1 × 20 мм. С четырех боковых сторон он с помощью эпоксидной смолы был обклеен пластинами из высокотеплопроводного материала, в качестве которого использовался монокристаллический карбид кремния. Наружная сторона конструкции напрямую охлаждалась проточной водой. Накачка осуществлялась диодным источником мощностью до 120 Вт с длиной волны излучения 940 нм и волоконным выходом с диаметром сердцевины волокна 105 мкм и числовой апертурой 0.22. Изображение выходного торца волокна с помощью телескопа с увеличением 3.75 переносилось внутрь АЭ.

Для теоретического исследования фазовых искажений применялась описанная в [11] модель, основанная на совместном решении системы балансных уравнений и уравнения теплопроводности. Задача решалась в трехмерном пространстве. Распределение накачки в АЭ рассчитывалось методом трехмерной трассировки лучей. По найденному распределению температуры вычислялся профиль фазовых искажений. При этом учитывалась только составляющая, связанная с зависимостью показателя преломления от температуры, т.к. тепловым расширением в приближении тонкого стержня можно пренебречь. Параметры задачи, использованные при расчете, приведены ниже. Учитывались зависимости сечения поглощения и теплопроводности от температуры. Фазовые искажения разделялись на параболическую составляющую (тепловая линза), для которой находилась оптическая сила, и непараболическую составляющую (абберации), для которой методом решения интегрального уравнения, аналогично [12], находился параметр качества пучка M^2 .

Сечение поглощения (см ²) [13]	2.07 + 6.37exp[-(T+273)/288] × 10 ⁻²¹
Время жизни (мс) [14]	0.95
Дефект кванта (%) [15]	6.8 %
Теплопроводность (Вт ⁻¹ ·м ⁻¹ ·К ⁻²), аппроксимация из [16]	13.27 - 0.016T
dn/dT (К ⁻¹) [17]	12.1 × 10 ⁻⁶
Коэффициент теплоотдачи на боковой поверхности стержня (Вт·см ⁻² ·К ⁻¹) [11]	12

На рис.1,а приведен теоретический профиль фазовых искажений в рассматриваемом квантроне, на рис.1,б представлены фазовые искажения в зависимости от поперечной координаты вдоль оси x (или y) и диагональной оси, для которых различие максимально. Видно, что зависимости очень хорошо совпадают в центре АЭ. Аппроксимация представленных зависимостей параболой позволяет определить оптическую силу тепловой линзы D, которая составила 30.9 и 29.6 м⁻¹ вдоль оси x и диагональной оси соответственно. Таким образом, различие в оптической силе тепловой линзы вдоль различных осей составило только 4.4%, что является незначительным и не оказывает заметного влияния на работу лазерной системы. Параметр качества пучка M^2 также вычислялся вдоль оси x и вдоль диагональной оси АЭ. Расчетная зависимость радиуса пучка от продольной координаты вдоль его каустики приведена на рис.2. Видно, что положения перетяжек для двух осей с хорошей точностью со-

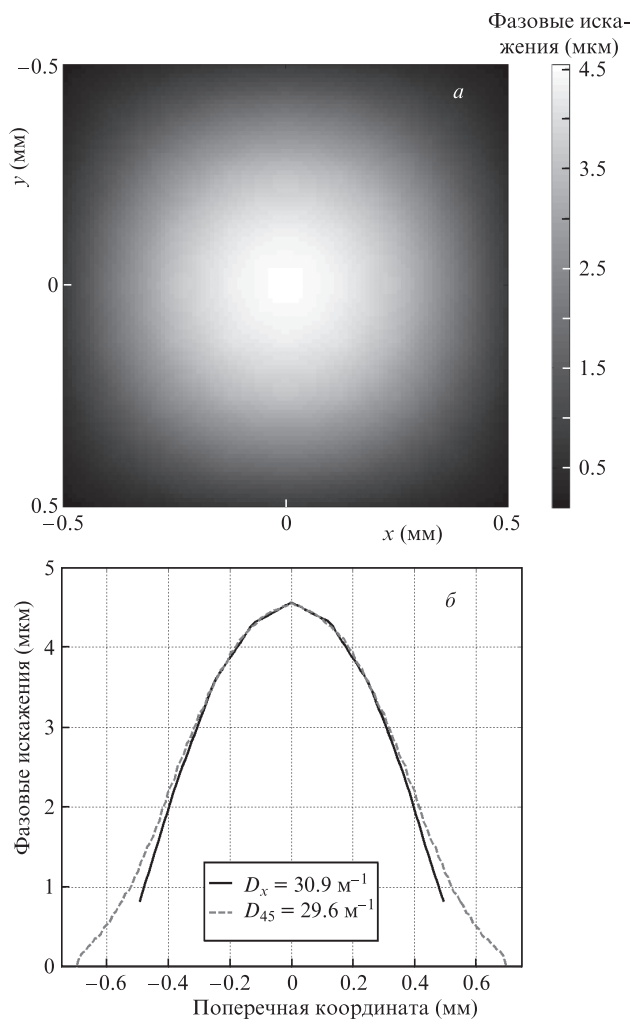


Рис.1. Расчетные профиль термонаведенных фазовых искажений (а) и зависимости фазовых искажений от поперечной координаты вдоль оси x и диагональной оси АЭ (б).

впадают, и это подтверждает равенство оптических сил тепловой линзы. Параметры M^2 по двум рассматриваемым осям также практически одинаковы: $M_x^2 = 1.083$, $M_{45}^2 = 1.088$.

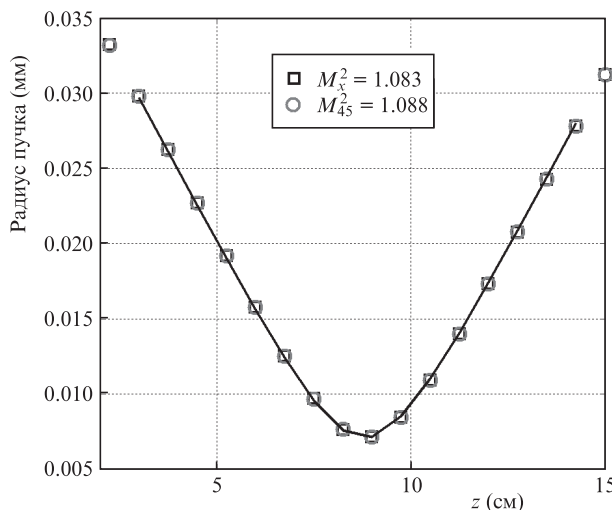


Рис.2. Расчетная зависимость радиуса пучка от продольной координаты z вдоль его каустики.

Экспериментальное исследование усиления в разработанном квантроне проводилось с использованием слабого и сильного сигналов. Источником слабого сигнала служил диодный лазер с одномодовым волоконным выходом излучения мощностью 10 мВт, с длиной волны 1030 нм и шириной спектра 1.5 нм. Источником сильного сигнала являлась лазерная система, состоящая из волоконного генератора и твердотельного усилителя на тонком Yb:YAG-стержне со средней мощностью излучения до 30 Вт при частоте следования импульсов 3 МГц и их длительности около 50 пс. Применялась простая однопроходная схема усилителя. На рис.3,а приведена зависимость коэффициента усиления от мощности накачки при слабом сигнале, а на рис.3,б – зависимость коэффициента усиления и КПД усилителя от мощности входного сигнала. При слабом сигнале коэффициент усиления достигает 30, а при сильном (20 Вт) сигнале КПД усилителя доходит до 30%, что сопоставимо с результатами, получаемыми в усилителях на тонких стержнях круглого сечения.

Замедление роста коэффициента усиления по слабому сигналу при большой мощности накачки связано со смещением спектра накачки в диапазон, превышающий 940 нм, что приводит к уменьшению коэффициента поглощения. Уменьшение эффективности усилителя при максимальной мощности сигнала, вероятно, связано с потерями излучения в оптической схеме усилителя. До-

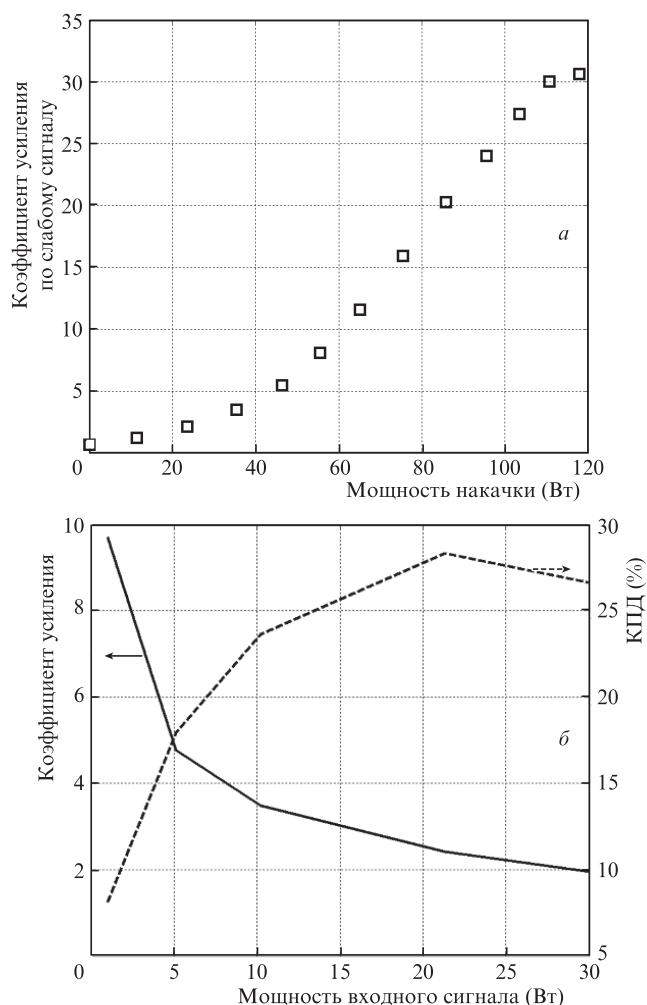


Рис.3. Экспериментальные зависимости коэффициента усиления от мощности накачки при слабом входном сигнале (а) и коэффициента усиления и КПД усилителя от мощности входного сигнала (б).

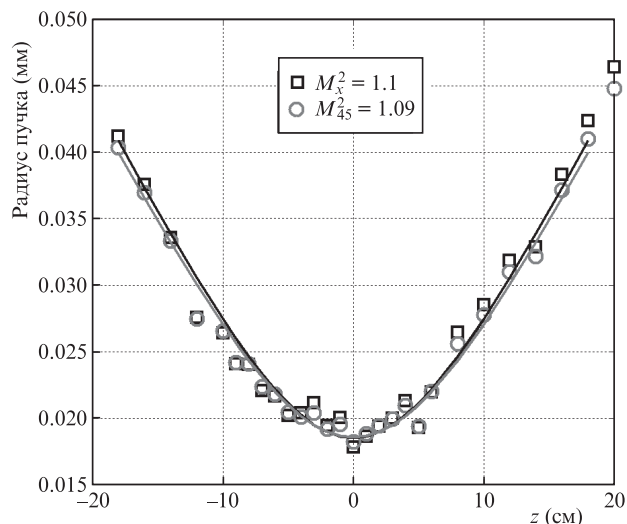


Рис.4. Экспериментальная зависимость радиуса пучка от продольной координаты z вдоль его каустики.

стигнутые значения коэффициента усиления и выходной мощности не были предельными и ограничивались в эксперименте только доступной мощностью накачки. Зависимости на рис.3,б могут использоваться при проектировании многоканального усилителя для различной мощности входного сигнала.

Экспериментальное исследование параметра M^2 проведено методом измерения профилей пучка вдоль перетяжки. Как и в расчете, радиусы пучков вычислялись вдоль оси x и вдоль диагональной оси АЭ. Измерения проводились при усилении слабого и сильного сигналов, что позволяло оценить влияние процесса усиления на качество пучка. На рис.4 приведена экспериментальная зависимость радиуса пучка вдоль его каустики для случая слабого сигнала. Вдоль обеих осей параметр M^2 получился практически одинаковым и близким к единице. Положения перетяжек вдоль обеих осей также совпадают. Значения M^2 с хорошей точностью совпадают с результатами расчета. Для случая сильного сигнала получен аналогичный результат. Таким образом, ни в расчете, ни в эксперименте не выявлено проблем качества пучка, связанных с использованием АЭ квадратного сечения.

3. Концепция многоканального усилителя

Благодаря своей технологичности АЭ в виде тонких стержней квадратного сечения могут быть успешно использованы при создании многоканального твердотельного усилителя. Нами предложена концепция такого усилителя, ключевым элементом которого является многоканальный, или «матричный» лазерный квантрон. Квантрон представляет собой набор параллельно и эквидистантно расположенных АЭ, пространство между которыми занимает система охлаждения. Эквидистантность АЭ позволяет использовать в качестве задающей системы многоканальный волоконный лазер с выводом излучения через линзовый массив для последующего когерентного сложения в дальней зоне [18]. Массив линз при этом должен иметь квадратную структуру и фокусировать пучки внутрь АЭ. Система охлаждения представляет собой слои высокотеплопроводного материала, внутри которых организованы каналы для протока охлаждающей жидкости. Такого рода конструкция может быть просто и тех-

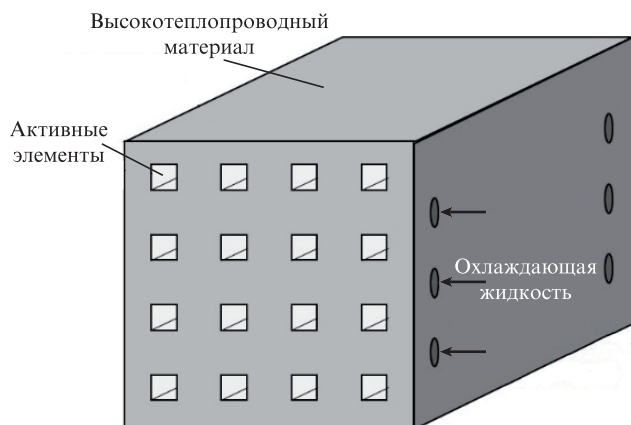


Рис.5. Общий вид многоканального, или «матричного» лазерного квантрона.

нологично реализована при использовании тонкостержневых АЭ квадратного сечения, которые приклеиваются боковой поверхностью к слоям высокотеплопроводного материала. Конструкция «матричного» лазерного квантрона изображена на рис.5.

В предлагаемой конструкции эквидистантность АЭ с погрешностью менее 10 мкм легко достигается использованием слоев высокотеплопроводного материала строго одинаковой толщины. Система накачки представляет собой набор диодных источников с волоконным выходом, пучок каждого из которых заводится в свой АЭ. Предпочтительно использовать источники большой яркости, обеспечивающие высокую интенсивность излучения на всей длине АЭ. На выходе усилителя пучки коллимируются еще одним линзовым массивом, после чего фокусируются общей линзой для когерентного сложения в дальней зоне.

4. Заключение

В настоящей работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование термонаведенных фазовых искажений излучения в АЭ в виде тонкого стержня квадратного сечения. Показано, что аксиальная асимметрия системы охлаждения вносит незначительные aberrации и не оказывает заметного влияния на параметр качества пучка. Таким образом, АЭ в виде тонких стержней квад-

ратного сечения могут применяться наравне со стержнями круглого сечения, но с использованием значительно более технологичных подходов при их изготовлении и монтаже в систему охлаждения. Предложена концепция многоканального твердотельного усилителя на основе АЭ в виде тонких стержней квадратного сечения. Основой усилителя является многоканальный, или «матричный» лазерный квантрон, в котором АЭ располагаются эквидистантно и параллельно друг другу, а пространство между ними занимает система охлаждения, представляющая собой слои высокотеплопроводного материала с каналами для протока охлаждающей жидкости. В качестве источника сигнала для данного усилителя может использоваться многоканальная волоконная система с выводом излучения через линзовый массив.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-72-00158).

1. Krauth J.J., Schuhmann K., Ahmed M.A., et al. *Nature*, **589**, 527 (2021).
2. Peralta E.A., Soong K., England R.J., et al. *Nature*, **503**, 91 (2013).
3. Salehi F., Goers A.J., Hine G.A., et al. *Opt. Lett.*, **42**, 215 (2017).
4. Gacheva E.I., Zelenogorskii V.V., Andrianov A.V., et al. *Opt. Express*, **23**, 9627 (2015).
5. Graves W.S., Bessuille J., Brown P., et al. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **17**, 120701 (2014).
6. Stark H., Buldt J., Müller M., et al. *Opt. Lett.*, **44** (22), 5529 (2019).
7. Soulard R., Quinn M.N., Tajima T., et al. *Acta Astronautica*, **105**, 192 (2014).
8. Délen X., Zaouter Y., Martial I., et al. *Opt. Lett.*, **38** (2), 109 (2013).
9. Markovic V., Rohrbacher A., Hofmann P., et al. *Opt. Express*, **23** (20), 25883 (2015).
10. Kuznetsov I., Mukhin I., Palashov O., et al. *Opt. Lett.*, **43** (16), 3941 (2018).
11. Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Silin D.E., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **50**, 3, 133 (2014).
12. Kuznetsov I., Pestov A., Mukhin I., et al. *Opt. Lett.*, **45** (2), 387 (2020).
13. Liu Q., Fu X., Gong M., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 9, 2081 (2007).
14. Sumida D.S., Fan T.Y. *Emission Spectra and Fluorescence Lifetime Measurements of Yb:YAG as a Function of Temperature*, in *Advanced Solid-State Lasers* (Optical Society of America, 1994).
15. Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А., et al. *Квантовая электроника*, **41**, 1045 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 1045 (2011)].
16. Sato Y., Akiyama J., Taira T. *Opt. Mater.*, **31**, 720 (2009).
17. Sato Y., Taira T. *Opt. Mater. Express*, **4** (5), 876 (2014).
18. Fsaifes I., Daniault L., Bellanger S., et al. *Opt. Express*, **28**, 20152 (2020).