

Генерация лазера с трубчатым активным элементом из кристалла калий-гадолиниевого вольфрамата с неодимом

В.С.Гулев*, С.Л.Микерин*, А.А.Ключников*, В.Д.Угожаев*, В.Ф.Нестеренко**, А.М.Юркин**

Исследована генерация лазера с активным элементом из калий-гадолиниевого вольфрамата с неодимом КГВ:Nd³⁺ в виде параллелепипеда с коаксиальным отверстием для лампы накачки. Экспериментально показано влияние анизотропии спектральных и лазерных свойств КГВ:Nd³⁺ и термической неоднородности на распределение интенсивности генерации в плоскости выходного зеркала в условиях, когда излучение накачки практически не возвращается в среду (модель неограниченной апертуры).

Ключевые слова: твердотельные лазеры, трубчатый активный элемент, калий-гадолиниевый вольфрагат с неодимом, анизотропия кристалла.

1. Введение

Одним из основных способов повышения эффективности твердотельных лазеров (ТТЛ) с ламповой накачкой является оптимизация конфигурации осветителя и активных элементов (АЭ). Ранее рядом исследователей были выдвинуты основные принципы такой оптимизации [1]. Было показано, что путём выбора геометрии осветителя, позволяющей увеличить время взаимодействия излучения накачки с АЭ, и согласования спектральных свойств возбуждающего излучения и АЭ удаётся существенно увеличить поглощение подводимой энергии активными центрами.

В ряде работ (напр., [2–5]) проводились сравнительные исследования лазеров с осветителями различных конфигураций, показавшие целесообразность такого пути. Было установлено, что одной из наиболее эффективных является конфигурация с трубчатым АЭ (ТАЭ), когда слой активной среды окружает цилиндрическую лампу. Теоретический КПД генерации таких лазеров на неодимовом стекле по вложенной в лампу энергии может достигать 25 % [6]. Достигнутый на практике КПД по генерации составил 9 % [6], а КПД по запасенной энергии возбуждения в объёме АЭ – 8 % [7], что в несколько раз превышает КПД, характерные для стандартной конфигурации системы накачки.

Важным фактором, определяющим эффективность поглощения возбуждающего излучения, является также концентрация активатора в АЭ. Один из перспективных в этом отношении кристаллических материалов – калий-гадолиниевый вольфрагат с неодимом КГВ:Nd³⁺ (КГВ:Nd³⁺). Для него характерна большая оптимальная атомная концентрация активатора – 3 % ($\sim 2 \cdot 10^{20}$ см⁻³),

что примерно на порядок выше, чем у ИАГ. Процесс роста этого кристалла более технологичен по сравнению с выращиванием ИАГ [8], благодаря чему возможно производство крупных оптически-однородных образцов. Однако применение КГВ в лазерах с большой средней мощностью обычно ограничено его невысокой теплопроводностью, приблизительно в 5 раз меньшей, чем у ИАГ. При принудительном охлаждении за счёт увеличения площади теплосъёма трубчатая конфигурация АЭ позволяет улучшить теплоотвод по сравнению с традиционной конфигурацией.

По своей структуре кристалл относится к моноклинной сингонии (пространственная группа $C_{2h-2/c}^6$). Оси индикатрисы его показателей преломления p , m , g (для $\lambda \approx 1.06$ мкм $n_p = 1.937$, $n_m = 1.986$, $n_g = 2.033$) ориентированы относительно кристаллографических осей a , b , c следующим образом: $p \parallel b$, $\angle m, a \approx 24^\circ$, $\angle g, c \approx 20^\circ$ [9–11]. Активные элементы обычно вырезаются вдоль оси роста кристалла, которая совпадает с осью b . Взаимная ориентация осей в поперечном сечении такого АЭ показана на рис.1.

Поляризация люминесценции ориентирована преимущественно вдоль оси m ; для этой поляризации эффективный термооптический параметр $\Delta n/\Delta T = 4.3 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ [10]. Спектры поглощения КГВ:Nd³⁺ для различных комбинаций направлений наблюдения и кристаллогра-

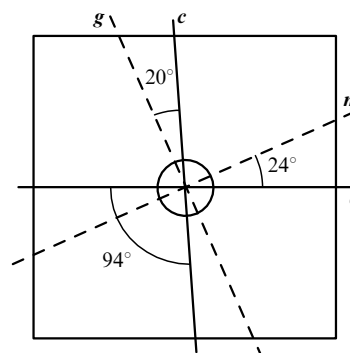


Рис.1. Ориентация осей и АЭ.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. В.А.Коптюга, 1; e-mail: SLMikierin@yandex.ru; gulev@postok.iae.nsk.su; web-site: http://www.iae.nsk.su

**Институт монокристаллов СО РАН, Россия, 630058 Новосибирск, Русская ул., 43

фических осей не идентичны (коэффициенты поглощения в отдельных полосах различаются в 3 раза). Коэффициент усиления тоже сильно зависит от направления возбуждающего излучения относительно кристаллографических осей [12].

2. Методика эксперимента

Для изучения влияния анизотропии свойств кристалла КГВ:Nd³⁺ на пространственные характеристики генерируемого излучения в настоящей работе применялась модель неограниченной апертуры АЭ. В этом случае аксиально-симметричное излучение лампы накачки не возвращается обратно в АЭ каким-либо отражающим устройством, т. е. проходит через него однократно.

В такой модели сводится к минимуму перемешивание возбуждающего излучения различных направлений и наиболее чётко проявляется анизотропия поглощения КГВ:Nd³⁺. Практически эта модель реализуется, если излучение накачки за один проход в АЭ существенно ослабляется. Исходя из этого выбиралась толщина АЭ в радиальном направлении. По нашим данным, усреднённый коэффициент поглощения КГВ:Nd³⁺ вдоль оси *c* (рис.1) в диапазоне длин волн 500–1000 нм составляет около 3 см⁻¹.

По этой причине при толщине АЭ свыше 3 мм вдоль оси *c* поглощаемое излучение накачки ослабляется примерно в 3 раза. Заметим, что вдоль оси *a* усреднённый коэффициент поглощения приблизительно в 2 раза меньше. Исходя из этих соображений был изготовлен АЭ в форме параллелепипеда со сторонами 15 × 15 × 30 мм, вырезанного вдоль оси *b*, с перпендикулярными к ней рабочими гранями. Лампа накачки находилась в отверстии диаметром 4 мм, просверленном вдоль оси АЭ.

Совместное действие ослабления излучения накачки и анизотропии поглощения приводит к азимутальной и радиальной неравномерности распределения возбуждения в АЭ. Вследствие этого в нем возникает поперечная неоднородность коэффициента усиления, причем усиление максимально вблизи отверстия в областях, прилегающих к оси *c*.

АЭ обладал высокой оптической однородностью, его рабочие поверхности не были просветлены. В качестве лампы накачки применялась импульсная ксеноновая лампа типа ИФК-20-3 с длиной разрядного промежутка 30 мм и номинальной электрической энергией 20 Дж. Она подключалась напрямую к конденсатору ёмкостью 100 мкФ. Длительность импульса накачки по полувысоте составляла около 250 мкс. Тепло в АЭ и лампе накачки рассеивалось посредством естественного охлаждения. Лазер работал в режиме свободной генерации с периодичностью вспышек 1.5–3 мин, минимальный порог генерации составлял приблизительно 13 Дж; превышение порога было не более 1.5.

Резонатор длиной около 10 см состоял из плоских зеркал Ø40 мм с пропусканием 0.6 % и 3.5 % на рабочей длине волны. Резонатор настраивался так, чтобы лучи, перпендикулярные к зеркалам, внутри АЭ проходили параллельно оси лампы накачки. Такое положение зеркал считалось нормальным, и от него отсчитывалась расстройка выходного зеркала. Кинетика интенсивности выходного излучения регистрировалась интегрально по всей апертуре с помощью фотодиода ЛФД-2 (временное разрешение лучше 1 мкс) и осциллографа С1-75. Инте-

гральное за время генерации распределение излучения в ближней зоне (т. е. на выходном зеркале) фиксировалось видеокамерой, соединённой с компьютером.

3. Обсуждение результатов

В случае небольших расстройок $\delta\varphi_1$ в вертикальной плоскости (см. рис.1) имело место снижение порога генерации. Минимальная пороговая энергия достигалась при $|\delta\varphi_1^{\text{opt}}| \approx 50 \pm 10''$ и была более чем вдвое ниже пороговой энергии при нулевой расстройке. Очевидной причиной снижения порога при разъюстировке является радиальная тепловая неоднородность, оцениваемая из перепада температур на толщине стенки ТАЭ: при максимальной энергии, вкладываемой в лампу накачки (20 Дж), перепад составлял несколько градусов Цельсия.

Обращает на себя внимание то, что в традиционных схемах такой резкой зависимости порога от разъюстировки не наблюдается. Более того, в традиционных схемах эта зависимость обычно противоположна, т. е. при расстройке порог возрастает [13]. По-видимому, различие порогов генерации можно объяснить специфичностью трубчатой геометрии АЭ и возникающими в нём термическими напряжениями.

В нормально настроенном лазере с ТАЭ световые лучи, идущие вдоль оси плоскопараллельного резонатора, отклоняются тепловой линзой к оси АЭ, т. е. в нерабочую область, тогда как в обычных схемах эти лучи попадают в область с более высоким усилением. При этом радиальная зависимость коэффициента усиления в ТАЭ резко обрывается у края отверстия на максимуме, тогда как в обычном АЭ она непрерывна. По-видимому, наличие разрыва и приводит к резкой зависимости порога генерации от расстройки. Плавное распределение интенсивности возбуждающего излучения в стержневом АЭ создаёт в центральной области, как известно, минимальные тепловые градиенты и тепловую линзу, близкую к сферической. В лазере с ТАЭ описанной конструкции градиенты вблизи края отверстия, напротив, максимальны, и возникающая линза является сильно асферической. Это ускоряет выход лучей в нерабочую область и усиливает зависимость потерь от расстройки.

Из-за различия интегрального поглощения вдоль осей *a* и *c* возникающая положительная тепловая линза оказывается аксиально-несимметричной – бифокальной (разумеется, описание линзы в терминах сферической оптики из-за сильной асферичности носит сугубо условный характер). Наименьшее фокусное расстояние, согласно измеренному $\delta\varphi_1^{\text{opt}}$, составляет около 15 м. Бифокальность приводит к тому, что в областях рабочей апертуры слева и справа от отверстия (см. рис. 1) потери излучения, а значит, и горизонтальные расстройки $\delta\varphi_{\pm}^{\text{opt}}$, соответствующие минимальным порогам, будут меньше $\delta\varphi_1^{\text{opt}}$.

Из соображений геометрической оптики экспериментальному значению $\delta\varphi_1^{\text{opt}} \sim 1'$ соответствует радиальная вариация показателя преломления $\delta n_1 \sim 10^{-5}$. Такое же значение даёт оценка, произведённая на основе расчёта тепловыделения в АЭ. Соответствующая оценка δn_1 для горизонтальной плоскости даёт значение, находящееся в пределах погрешности юстировки ($\sim 10''$). В эксперименте при расстройках выходного зеркала в горизонтальной плоскости смещения оптимальной настройки не наблюдалось.

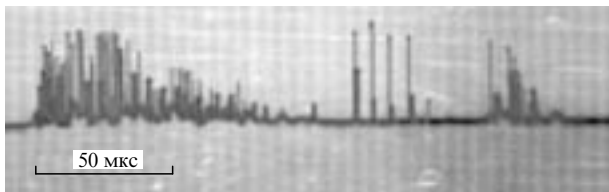


Рис.2. Оциллограмма генерации.

Оциллограммы демонстрируют пиковый характер выходного излучения, типичный для свободной генерации ТТЛ. При максимальной энергии накачки наблюдались два и более участка переходных пульсаций, что соответствует многопороговому режиму (рис.2). Описанные особенности кинетики генерации указывают на то, что выходной пучок разбивается на несколько независимых каналов.

На рис.3 представлены типичные изображения поперечного распределения выходного излучения в зависимости от углов расстройки. На первых семи картинках показаны распределения излучения при различных положительных (рис.3, *a–z*) и отрицательных (рис.3, *д–жс*) расстройках резонатора в вертикальной плоскости. Согласно используемой модели неограниченной апертуры, распределения излучения ниже (рис.3, *a–z*) и выше (рис.3, *д–жс*) отверстия должны быть аналогичными.

Наблюдаемое различие между ними выражается в большей протяженности пятна генерации в направлении к верхней грани АЭ (рис.3, *д–жс*) и обусловлено диффузным отражением от клеевой прослойки, фиксирующей АЭ. Генерация слева на рис.3, *д–жс* отсутствует из-за наличия электрических выводов от лампы накачки. Максимумы интенсивности в областях генерации сверху и снизу от отверстия несколько смещены относительно вертикальной оси. Ось, проходящая через них, отклонена от вертикали на угол $4.5 \pm 1.5^\circ$ (см. рис.3, *a, e, жс*), т. е. в пределах статистического разброса она параллельна кристаллографической оси *c*. Именно в этом направлении реализуются максимальные коэффициенты поглощения и поперечное сечение лазерного перехода в случае, если лампа накачки параллельна оси *b*. При расстройках одновременно в обеих плоскостях (рис.3, *з–л*) область генерации стремится как бы охватить отверстие.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе достаточно ясно показано проявление анизотропии свойств КГВ и неоднородности распределения поглощенной энергии накачки в исследованном ТАЭ при малых превышениях порога генерации. Наиболее существенны следующие особенности генерируемого излучения:

- азимутальная неоднородность поперечного распределения, проявляющаяся в преимущественной концентрации излучения в областях рабочей апертуры, смежных с плоскостью ось *c* – ось отверстия в АЭ;
- радиальная неоднородность (излучение концентрируется в областях, прилегающих к отверстию);
- повышение пороговой энергии генерации в нормально съюстированном резонаторе из-за тепловой линзы;
- разбиение генерирующей области на независимые каналы.

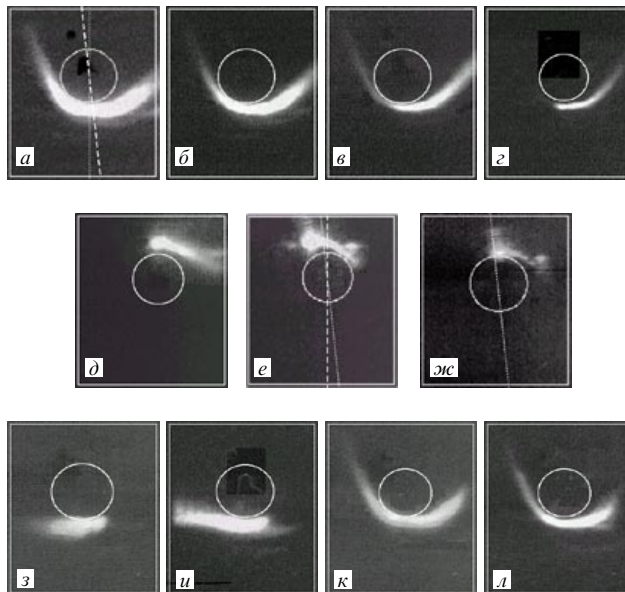


Рис.3. Пространственное распределение интенсивности генерации при горизонтальных и вертикальных расстройках выходного зеркала, равных соответственно 0 и $45''$ (*a*), 0 и $1'05''$ (*б*), 0 и $1'15''$ (*в*), 0 и $2'35''$ (*г*), 0 и $-1'15''$ (*д*), 0 и $-2'05''$ (*е*), 0 и $-2'25''$ (*жс*), $10''$ и $15''$ (*з*), $20''$ и $35''$ (*и*), $-10''$ и $55''$ (*к*), $4'40''$ и $-4'15''$ (*л*).

Для создания лазеров с ТАЭ из КГВ необходимо обеспечить однородность накачки АЭ, сводящую к минимуму термооптические эффекты и анизотропию спектроскопических свойств материала. Это может быть достигнуто выбором размеров и геометрии наружной поверхности ТАЭ (возможно, отличающейся от окружности) в сочетании с диффузным отражателем, а также применением резонатора специальной конфигурации для компенсации термооптических искажений в АЭ [14]. Последнее условие для эффективных трубчатых лазеров является необходимым, тогда как для обычных схем оно не обязательно.

1. Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е. *Лазеры на неодимовом стекле* (М., Наука, 1990, § 2.5).
2. Lesnick I.P. *IEEE Spectr.*, **3**, 149 (1966).
3. Бученков В.А., Винокуров Г.И., Малинин Б.Г. и др. *Изв.АН СССР. Сер. физич.*, **52**, 281 (1988).
4. Грацианов К.В., Малинин Б.Г., Пенков В.Г. и др. В сб. *Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника*, вып. 2, 18 (1990).
5. Hodgson N., Haase T., Weber H. *Proc.SPIE*, **1277**, 70 (1990).
6. Мак А.А., Фромзель В.А., Щербаков А.А. и др. *Опт.-мех.пром.*, № 1, 58 (1983).
7. Бученков В.А., Винокуров Г.Н., Миронов Е.П. и др. *Квантовая электроника*, **12**, 1702 (1985).
8. Осико В.В. *ДАН СССР*, **51**, 1253 (1987).
9. Мочалов И.В. *Опт.журн.*, № 11, 4 (1995).
10. Жиленис А.А., Малдугис Э.К., Гульбинас И.А. и др. В сб. *Лазеры и оптическая нелинейность* (Вильнюс, изд-е ИФАН ЛитССР, 1987, с. 340).
11. Ананьева Г.В., Афанасьев И.И., Васильева В.И. и др. *Опт.-мех.пром.*, № 8, 35 (1983).
12. Каминский А.А., Саркисов С.Э., Павлюк А.А. и др. *Изв.АН СССР. Сер. Неорганические материалы*, **16**, 720 (1980).
13. Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И. *Термооптика твердотельных лазеров* (Л., Машиностроение, 1986, 2.1, с. 79).
14. Gulev V.S., Mikerin S.L., Ugozhayev V.D. et.al. *Proc.SPIE*, **2713**, 135 (1996).