

УДК 621.373.825

Ю. Д. Голяев
А. В. Грушецкий
К. Н. Евтюхов
Л. Н. Капцов

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЛИНЗЫ В КРИСТАЛЛЕ АЛЮМО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА НА СТАБИЛЬНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА

Показано, что относительные флуктуации фокусного расстояния тепловой линзы, наведенной в кристалле $YAG:Nd^{3+}$ непрерывного лазера с общим потоком охлаждения лампы накачки и кристалла, имеют величину порядка 20%. Теоретический расчет, подтвержденный экспериментальными измерениями, показывает, что эти флуктуации обуславливают относительные колебания мощности излучения не менее 10%, а также оказывают заметное влияние на спектральный состав излучения.

В активном элементе твердотельного лазера вследствие нагрева лампы накачки возникают термические напряжения, вызывающие изменение показателя преломления по сечению элемента. Установлено [1—5], что в результате этого активный элемент, например кристалл $YAG:Nd^{3+}$, приобретает свойства сферической положительной линзы, называемой тепловой. Фокусное расстояние линзы зависит от индивидуальных свойств кристалла, условий его охлаждения и мощности накачки. Оптическая неоднородность кристалла и неравномерность его освещения и охлаждения приводят к астигматизму тепловой линзы.

Статические свойства и некоторые переходные процессы образования тепловой линзы достаточно хорошо изучены [4—6]. Однако флуктуационный характер изменения параметров тепловой линзы в непрерывном лазере не исследовался. В то же время флуктуации параметров тепловой линзы являются одной из главных причин нестабильности мощности и спектрального состава излучения твердотельного лазера. В связи с этим исследование влияния флуктуаций параметров тепловой линзы на стабильность излучения лазера и нахождение способов уменьшения этого влияния является актуальной задачей. В настоящей работе поставленный вопрос изучается на примере непрерывного лазера на кристалле граната с неодимом.

§ 1. Экспериментальное исследование флуктуаций оптической неоднородности кристалла

Исследование оптической неоднородности кристалла проводилось интерференционным методом [2]. В качестве источника когерентного излучения использовался лазер ЛГ-56 ($\lambda=0,63$ мкм), работавший в одночастотном режиме. Интерференционные картины, полученные путем совмещения лучей, отраженных от передней и задней граней кристалла, представляли собой системы интерференционных полос, приближавшихся по форме к эллипсам.

Для обнаружения и количественной оценки флуктуаций параметров тепловой линзы проводилось последовательное фотографирование

интерференционной картины с интервалами порядка 5 с. Для каждого из исследованных образцов кристалла YAG:Nd³⁺ было сделано по 36 фотоснимков. Результаты, полученные для двух образцов, аналогичны. Поэтому ниже приводятся данные только для первого образца. Охлаждение газоразрядной лампы накачки типа ДКрТВ-3000 и кристалла осуществлялось неразделенным водяным потоком. Использовались система охлаждения и блок питания от серийного лазера типа ЛТ-2.

Для обнаружения астигматизма тепловой линзы измерялись радиусы темных интерференционных полос $r_s(\varphi, t)$. Индекс s указы-

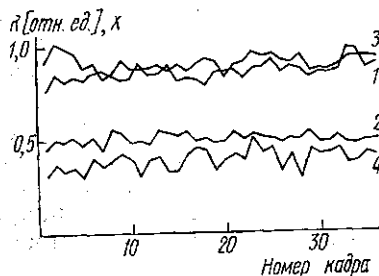


Рис. 1. Флуктуации радиуса кривизны тепловой линзы и длины кристалла

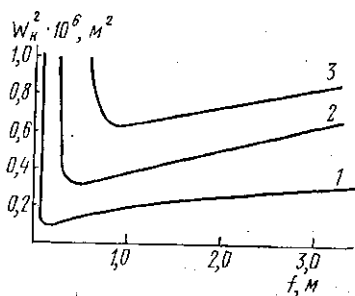


Рис. 2. Зависимость площади сечения пучка в середине резонатора от фокусного расстояния тепловой линзы

ет номер полосы, отсчитываемой от центра интерференционной картины, полярная координата φ учитывает направление радиуса-вектора \mathbf{r} , а зависимость от времени t определяется в измерениях номером кадра.

Выразим длину кристалла по центральной оси формулой

$$d = m_0 \frac{\lambda_k}{2} + x \lambda_k, \quad (1)$$

где $0 \leq x \leq 0,5$, λ_k — длина волны излучения гелий-неонового лазера в кристалле YAG:Nd³⁺, m_0 — число полуволн, целиком укладываемых на длину кристалла. Тогда формулы, определяющие x и радиус кривизны тепловой линзы для заданного направления φ , имеют вид

$$x_{s,\varphi} = \frac{r_{s,\varphi}^2}{2(r_{s+1,\varphi}^2 - r_{s,\varphi}^2)}, \quad (2)$$

$$R_{s,\varphi} = \frac{r_{s,\varphi}^2}{\lambda [x_{s,\varphi} + 0,5(s-1)]}. \quad (3)$$

При выводе формул (2) и (3) радиус кривизны R_s в промежутке между соседними кольцами s и $s+1$ считался неизменным. Заметим, что если нет необходимости в определении абсолютных значений R , а требуется найти лишь относительные изменения радиуса кривизны, то расчет может выполняться по увеличенным изображениям интерференционной картины, полученной в слабо расходящихся лучах.

Результаты исследования флуктуаций радиуса кривизны R и длины кристалла показаны на рис. 1, где отложены значения R_1 , из-

меренные для двух взаимно перпендикулярных направлений радиус-вектора (кривые 1 и 2), значения R_2 (кривая 3) и x_1 (кривая 4). Кривые на рис. 1 позволяют сделать следующие выводы, подтверждающиеся также измерениями на другом образце: радиус кривизны тепловой линзы увеличивается к периферии кристалла и существенно неодинаков в различных направлениях. Относительные флуктуации радиуса кривизны и, следовательно, эффективного фокусного расстояния тепловой линзы в исследованном режиме составили величину порядка 20%. В результате флуктуаций тепловая линза перекашивается, так как значения R_1 для различных направлений коррелированы слабо. Флуктуации оптимальной длины кристалла по центральной оси не превышают $0,5\lambda \approx 0,31$ мкм.

Измерения нестабильности мощности накачки и принудительное изменение условий охлаждения кристалла при незначительном изменении скорости потока охлаждающей жидкости, а также изменении характера турбулентности этого потока показали, что основной причиной возникновения флуктуаций тепловой линзы следует считать нестационарные процессы в системе охлаждения — нестационарный разогрев отдельных частей кристалла. При этом важно отметить, что любые нарушения теплового баланса на поверхности кристалла, например местный нагрев этой поверхности, сначала вызывают изменение кривизны тепловой линзы и лишь затем, после распространения тепла к центру кристалла, изменение его длины. Таким образом, наличие флуктуаций длины кристалла в центральной его части, которые легко регистрируются по смещению колец интерференционной картины помещенными в нее фотоприемниками, неизбежно сопровождаются флуктуациями среднего фокусного расстояния тепловой линзы.

§ 2. Влияние флуктуаций тепловой линзы на стабильность мощности излучения непрерывного лазера

Конфигурация светового пучка в резонаторе, состоящем из двух плоских зеркал и тонкой собирающей линзы посередине, в приближении гауссовых пучков рассчитывается в работе [7]. Радиусы пучка на зеркалах ω_0 и в сечении линзы ω_k определяются формулами

$$\omega_0 = \left[\frac{\lambda_r f}{\pi} \sqrt{\frac{z}{f} \left(2 - \frac{z}{f} \right)} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

$$\omega_k = \left[\frac{2\lambda_r f}{\pi} \sqrt{\frac{z}{2f - z}} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где λ_r — длина волны излучения, f — фокусное расстояние линзы, $2z$ — оптическая длина резонатора.

Мощность излучения P при прочих равных условиях практически пропорциональна объему задействованной области активного элемента. Так как площадь сечения пучка в кристалле может считаться равной $\pi\omega_k^2$, то очевидно, что мощность P линейно связана с ω_k^2 . Для оценки этой зависимости на рис. 2 представлены графики зависимости ω_k^2 от фокусного расстояния f для резонаторов длиной 30 см (кривая 1), 1 м (кривая 2) и 2 м (кривая 3). Кривые на рис. 2 позволяют оценить относительные флуктуации мощности P , вызванные флуктуациями фокус-

ного расстояния тепловой линзы f . Кривые показывают также области, при приближении к которым флуктуации f могут вызвать срывы генерации. Оценки показывают, что в широком интервале изменений f порядок величины относительных флуктуаций мощности излучения $\Delta P/P$ составляет при $\Delta f/f \approx 20\%$ величину порядка 10% . В проведенных нами экспериментах относительные флуктуации мощности всегда несколько превышали эту величину.

Для установления связи между флуктуациями тепловой линзы и мощностью излучения была собрана установка, представленная на рис. 3.

ФЭУ помещался в области локализации интерференционной картины, образованной отражением излучения He—Ne-лазера передней и задней гранями кристалла YAG : Nd³⁺. Соответствующим выбором рабочей точки на интерференционной картине можно добиться практически линейной зависимости интенсивности света, падающего на фотокатод ФЭУ от кривизны тепловой линзы.

Мощность излучения лазера регистрировалась с помощью фотодиода ФД-24.

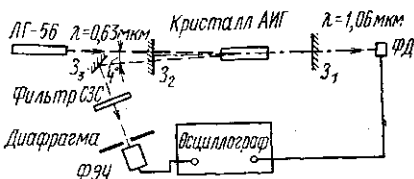


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки. Z_1 и Z_2 — зеркала резонатора; Z_3 — поворотное зеркало

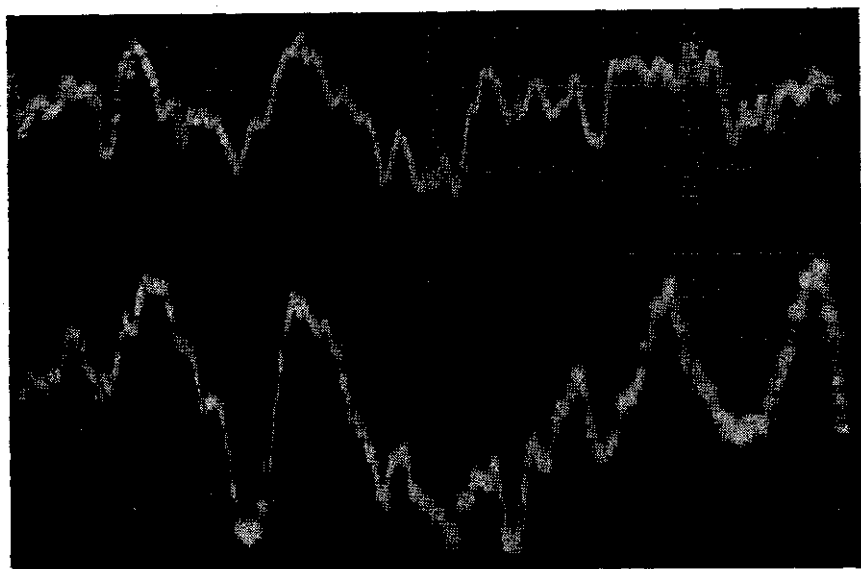


Рис. 4

Сигналы с фотодиода и ФЭУ подавались на двухлучевой осциллограф. Полученные таким путем осциллограмм, демонстрирующая сильную корреляцию между флуктуациями тепловой линзы и мощностью излучения лазера. Этот результат показывает, что в исследуемом лазере флуктуации тепловой линзы вносят основной вклад в нестабильность мощности излучения.

§ 3. Влияние флуктуаций тепловой линзы на спектр излучения непрерывного лазера

Наличие собирающей линзы в резонаторе лазера приводит к сдвигу частот генерируемых мод. Зависимость частоты ν от оптической длины резонатора и фокусного расстояния линзы дается следующей формулой [7]:

$$\nu = \nu_0(z) \left[(q+1) + \frac{2p+l+1}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{z}{f} \right) \right], \quad (6)$$

где $\nu_0 = c/4z$ — межмодовое расстояние, q , p и l — аксиальный, радиальный и угловой индексы соответственно.

Расчеты, сделанные по формуле (6) для конкретных и различных параметров системы при среднем $f=100$ см, $\Delta f/f=20\%$ и $\Delta x=0,25$, показывают следующее.

Относительное отклонение частоты основной аксиальной моды T_{00q_n} больше в более коротких резонаторах и составляет величину порядка $10^{-6} \div 10^{-7}$.

Наличие флуктуаций тепловой линзы вызывает относительное смещение частот поперечных мод с различными радиальными и угловыми индексами.

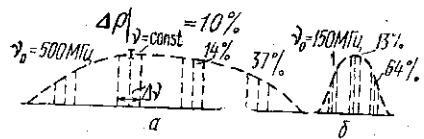
Флуктуации частоты, вызванные флуктуациями тепловой линзы, оказывают воздействие на стабильность мощности излучения отдельных мод.

Анализ экспериментальных спектров позволяет определить форму и ширину огибающей спектра, которую можно назвать линией генерации.

Рассмотрим симметричное расположение частот внутри линии генерации, как это показано на рис. 5. На этом рисунке отмечены области отклонения частот от их средних значений, рассчитанные по формуле (6) при величине $\Delta x=0,25$, что позволяет оценить уровень относительных флуктуаций мощности излучения отдельных мод $\Delta P_\nu/P_\nu$. При расчете необходимо учесть, что при постоянном значении $\nu \Delta P/P$ составляет, как указывалось выше, примерно 10%.

Полученные значения $\Delta P_\nu/P_\nu$ приведены на рис. 5. Они показывают, что как в коротком, так и в длинном резонаторах мощность боковых

Рис. 5. Спектр генерации лазера: а — резонатор длиной 30 см; б — резонатор длиной 100 см



мод флуктуирует на десятки процентов. Такая чувствительность непрерывного лазера к флуктуациям тепловой линзы в совокупности с другими дестабилизирующими причинами приводит к срыву генерации боковых мод.

Это явление чрезвычайно затрудняет создание систем стабилизации частоты непрерывного лазера на алюмо-иттриевом гранате, работающего в многочастотном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонтович А. М., Ведута А. П. — ЖЭТФ, 1964, 46, вып. 1.
2. Ананьев Ю. А., Козлов Н. А., Мак А. А., Степанов А. И. — «Журн. прикладной спектроскопии», 1966, 5, вып. 1.

3. Кoeschneг W. — «Appl. Opt.», 1970, 9, N 11.
4. Дмитриев В. Г., Уманский Б. М., Шкунов Н. В. — «Квантовая электроника», 1971, № 2.
5. Белостоцкий Б. Р., Рубанов А. С. Тепловой режим твердотельных оптических квантовых генераторов. М., 1973.
6. Желтов Г. И., Рубанов А. С. «Журн. прикладной спектроскопии», 1975, 22, вып. 3.
7. Kogelnik H. «Proc. IEEE», 1966, 54, N 10.

Поступила в редакцию

23.3 1977 г.

Кафедра

общей физики для мехмата