

В. Н. АЛЕКСЕЕВ, Ю. А. АНАНЬЕВ, Э. Ф. ДАУЭНГАУЭР

МОЩНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

(Представлено академиком А. М. Прохоровым 21 V 1973)

Телескопический резонатор ^(1, 2) уже давно используется для уменьшения угловой расходимости излучения твердотельных лазеров (например, ^(3, 4)), однако все опубликованные по этому поводу материалы пока относились только к генераторам со сравнительно невысокими энергетическими характеристиками. В настоящей работе объектом исследований служил лазер, обладающий уже достаточно большим удельным энерго-съемом (свыше 4 дж/см³ в импульсе). Результаты этих исследований по существу подводят итоги цикла работ ^(3, 5-8), направленных на усовершенствование твердотельных генераторов с традиционными активными элементами круглого сечения. Кроме того, обсуждаются перспективы дальнейшего улучшения характеристик твердотельных лазеров со свободной генерацией.

Активным элементом в наших экспериментах служил стержень диаметром 45 и длиной 620 мм из неодимового стекла с коэффициентом неактивного поглощения на рабочей длине волны $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹. Для его накачки использовалась высокоэффективная четырехламповая осветительная система ⁽⁵⁾, обеспечивающая удовлетворительную равномерность освещения образца ⁽⁶⁾. Конструкция осветителя была в общих чертах сходна с конструкцией головки серийного прибора ГОС-1001; некоторая ее доработка позволила обеспечить достаточную надежность работы при форсированных режимах накачки. Каждая из 4 ламп типа ИФП-20000 питалась хорошо сформированным импульсом длительностью ~ 5 мсек и энергией ~ 40 кдж.

Выходная энергия генератора при плоском резонаторе составляла около 5000 дж, угловая расходимость излучения (по уровню 0,5 интенсивности) φ более 5'. Переход к телескопическому резонатору привел к уменьшению φ до 30''–40''; половина энергии излучения, равной в этом случае 4500 дж, оказалась сосредоточенной в угле раствором меньше 2'. Параметры использованного телескопического резонатора: коэффициент увеличения $M=2$, расстояние между зеркалами ~ 1 м. В соответствии с рекомендациями ^(3, 9) были приняты меры для устранения возможных источников так называемой сходящейся волны; юстировка резонатора осуществлялась по методике ⁽¹⁰⁾.

Аналогичные эксперименты были произведены также с генератором, который состоял из двух головок, установленных последовательно в общем телескопическом резонаторе с $M=5$ и базой порядка 2 м. При выходной энергии около 8000 дж * угловая расходимость излучения оказалась даже несколько меньшей, чем в случае одной головки. Этот результат может быть объяснен в рамках развитых в ⁽²⁾ представлений: хотя установка двух головок приводит к удвоению волновых aberrаций на одном проходе резонатора, зато и «чувствительность» системы к aberrациям низко-

* В этих условиях стержни из неодимового стекла выдерживали лишь небольшое число вспышек.

го порядка при переходе от $M=2$ к $M=5$ заметно уменьшается. Кроме того, за счет уменьшения диаметра выпуклого зеркала (с 22 до 9 мм) увеличивается сечение выходящего из резонатора пучка, причем добавляется близко расположенная к оси зона со сравнительно небольшими термическими деформациями резонатора.

Приведенные данные доказывают возможность использования телескопического резонатора для уменьшения угловой расходимости излучения генераторов, обладающих высокой эффективностью и большой выходной энергией. Однако нельзя забывать, что для реализации малой угловой расходимости необходимо принимать все возможные меры для уменьшения деформаций резонатора. В случае лазеров на неодинаковом стекле главным источником этих деформаций являются термические эффекты, поэтому для достижения удовлетворительных результатов нам пришлось не только использовать осветитель со сравнительно высокой равномерностью освещения стержня, но и тщательно контролировать тепловой режим образца. В то же время попытки применить телескопический резонатор для повышения степени направленности излучения, например, генератора ГОС-1000, термические эффекты в котором весьма велики ⁽⁶⁾, едва ли могут увенчаться успехом.

Необходимо также иметь в виду, что, помимо высокой равномерности возбуждения активной среды, решение проблемы расходимости требует также применения высококачественных зеркал, особо тщательной юстировки и т. д.

Рассмотрим кратко пути дальнейшего улучшения характеристик твердотельных лазеров со свободной генерацией. Если исключить вопросы, связанные с возможностью создания новых источников накачки, то узловой проблемой пока остается проблема ликвидации (или уменьшения) термических деформаций резонатора. Наибольший интерес представляют, пожалуй, два способа ее решения.

Один из них заключается в том, что пучок генерируемого излучения пропускается через активный элемент наклонно к его боковым поверхностям и несколько раз претерпевает на них полное внутреннее отражение. При этом каждый луч параллельного пучка проходит сквозь все слои образца с различной температурой и показателем преломления, что приводит к выравниванию оптических путей, т. е. к отсутствию термических деформаций. Генерация подобных пучков излучения в активных элементах прямоугольного и восьмигранного сечения впервые наблюдалась М. П. Ванюковым и др. ⁽¹¹⁾. Различные схемы генераторов и усилителей с полным внутренним отражением на боковых стенках оживленно обсуждались в 1965—1968 гг. ⁽¹²⁻¹⁴⁾; указывалось, что с их помощью может быть решена проблема термических деформаций ⁽¹⁴⁾. Наконец, в самое последнее время внимание к этому направлению вновь привлечено работой ⁽¹⁵⁾, в которой возможность ликвидации термических деформаций продемонстрирована экспериментально.

К сожалению, реализация генераторов с полным внутренним отражением сталкивается с рядом трудностей, причем не только чисто технологических (необходимость точной обработки боковых поверхностей), но и принципиальных. Так, в случае применения простейших схем, обсуждаемых в ⁽¹⁵⁾, четверть объема активного элемента вообще не используется, а в четверти объема плотность излучения удваивается (см. рис. 1) по сравнению с плотностью в обычных генераторах, что снижает порог разрушения образца. Необходимо также иметь в виду, что влияние термических деформаций в схемах такого рода ликвидируется полностью лишь для строго параллельных пучков. Но для получения узконаправленного излучения при большой апертуре генератора плоские резонаторы практически непригодны ⁽¹⁶⁾, а в неустойчивых резонаторах по крайней мере один из двух пучков, распространяющихся в противоположных направлениях, является расходящимся. Наличие расходящегося пучка приводит к тому,

что распределенные по длине образца источники аббераций должны играть определенную роль и в генераторах с полным внутренним отражением.

Приведем результаты соответствующего анализа, выполненного для изображенного на рис. 1 телескопического резонатора с четным числом отражений от боковых поверхностей (нечетное число отражений N невыгодно, так как при этом резко возрастает влияние аббераций нечетного порядка; на рис. 1 $N=2$). Расчеты показывают, что в отличие от обычных

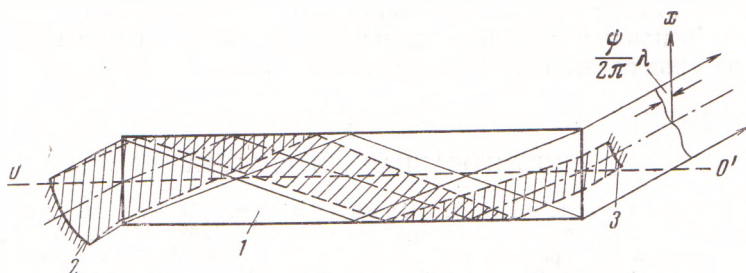


Рис. 1. Схема лазера с телескопическим резонатором и двукратным отражением от боковых стенок активного элемента: 1 — активный элемент, 2, 3 — соответственно вогнутое и выпуклое зеркала телескопического резонатора, 4 — волновой фронт генерируемого пучка

схем здесь искривление волнового фронта генерируемого излучения, вызванное распределенными источниками аббераций, в первом приближении не зависит от коэффициента увеличения резонатора M . Если показатель преломления n представить в виде ряда

$$n = n_0 + n_1 x/a + n_2 (x/a)^2 + \dots,$$

где x — расстояние до плоскости OO' , $2a$ — толщина образца (см. рисунок), то распределение фазы $\psi(x)$ генерируемого пучка будет описываться соотношением

$$\psi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_0 x}{[(L/2aN)^2 + 1]^{1/2}} - \frac{2\pi}{\lambda} [L^2 + (2aN)^2]^{1/2} \left\{ \frac{n_1}{4N} \left(\frac{x}{a} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{n_2}{6N} \left[\left(\frac{x}{a} \right)^3 - \frac{x}{a} \right] + \dots + \frac{n_k}{2(k+1)N} \left[\left(\frac{x}{a} \right)^{k+1} - \frac{1 + (-1)^k}{2} \frac{x}{a} \right] + \dots \right\}$$

L — длина образца. В правой части этого соотношения первый член, пропорциональный n_0 , соответствует просто наклону пучка по отношению к плоскости OO' . Член с n_1 описывает влияние аббераций первого порядка (оптический клин), которые могут возникнуть при неравной освещенности боковых поверхностей образца, а также при его механическом изгибе. Видно, что оптический клин толщиной $2n_1L$ приводит к тому, что фронт выходящей из резонатора волны становится сферическим со стрелкой прогиба $\sim n_1L/(4N)$ (в этих оценках $[L^2 + (2aN)^2]^{1/2}$ можно заменить на L). Наличие термической «линзы» оптической толщиной n_2L вызывает антисимметричное искажение волнового фронта с максимальной разностью хода $\sim 0,13 n_2L/N$ и т. д. Поскольку использование схем с $N > 4$ едва ли разумно, можно сделать общий вывод, что влияние термических эффектов и изгиба стержня оказывается ослабленным по сравнению с обычным случаем в 10–30 раз.

Второй способ уменьшения термических деформаций резонатора касается только лазеров на стекле и заключается в соответствующем подборе состава матрицы. В соответствии с (6), этот способ особенно перспективен при использовании активных элементов прямоугольного сечения: в этом случае градиент показателя преломления для излучения одной из поляризаций полностью отсутствует при выполнении условия $|P| = Q$, где P и Q —

введенные в (⁶) термооптические постоянные. Из результатов (⁸, ¹⁷⁻¹⁹) следует, что разработка такого состава стекла является вполне реальной задачей. В то же время для обычных стержней круглого сечения, которые использовались и в настоящей работе, деформации резонатора исчезают лишь при $P=Q=0$, чего добиться почти невозможно.

Оба рассмотренных приема борьбы с термическими деформациями требуют перехода к стержням прямоугольного сечения *. По-видимому, этот переход в сочетании с соответствующими технологическими проработками и является основным условием дальнейшего совершенствования твердотельных лазеров со свободной генерацией.

Поступило
3 IV 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. А. Ананьев, Н. А. Свенцицкая, В. Е. Шерстобитов, Авт. свид. № 274254 с приоритетом от 18 III 1968.
- ² Ю. А. Ананьев, В сборн. Квантовая электроника, № 6, 1971, стр. 3.
- ³ Ю. А. Ананьев, Г. Н. Випокуров и др., ЖЭТФ, 58, 786 (1970).
- ⁴ М. П. Ванюков, А. В. Горланов и др., В сборн. Квантовая электроника, № 4, 1971, стр. 117.
- ⁵ Ю. А. Ананьев, И. М. Бужинский и др., Оптико-механич. пром., № 9, 26 (1968).
- ⁶ Ю. А. Ананьев, Н. И. Гришманова, Журн. прикл. спектроскоп., 12, 668 (1970).
- ⁷ Ю. А. Ананьев, Н. И. Гришманова и др., Там же, 13, 227 (1970).
- ⁸ Ю. А. Ананьев, В. Е. Шерстобитов, О. А. Порохов, В сборн. Квантовая электроника, № 1, 1971, стр. 91.
- ⁹ Ю. А. Ананьев, В. Е. Шерстобитов, В сборн. Квантовая электроника, № 3, 1971, стр. 82.
- ¹⁰ Л. В. Ковальчук, Н. А. Свенцицкая, В сборн. Квантовая электроника, № 5 (11), 1972, стр. 80.
- ¹¹ М. П. Ванюков, В. И. Исаенко, В. А. Серебряков, ЖЭТФ, 44, 1493 (1963); 46, 1182 (1964); 47, 2019 (1964).
- ¹² A. I. de Magia, Proc. IEEE, 53, 1757 (1965).
- ¹³ Н. Г. Бондаренко, И. В. Еремина, Б. И. Таланов, Письма ЖЭТФ, 6, 459 (1967).
- ¹⁴ Б. Б. Бойко, Н. С. Петров и др., Журн. прикл. спектроскоп., 8, 351 (1968).
- ¹⁵ А. М. Микаэлян, В. В. Дьяченко, В сборн. Квантовая электроника, № 5 (11), 1972, стр. 97.
- ¹⁶ Ю. А. Ананьев, УФН, 103, 705 (1971).
- ¹⁷ И. М. Бужинский, Е. М. Дианов и др., ДАН, 190, 558 (1970).
- ¹⁸ Е. М. Дианов, А. М. Прохоров, ДАН, 192, 531 (1970).
- ¹⁹ А. А. Мак, В. М. Митькин и др., Оптико-механич. пром., № 9, 42 (1971).
- ²⁰ А. М. Бонч-Бруевич, Я. А. Имас, В. А. Молчанов, Журн. прикл. спектроскоп., 1, 45 (1964).
- ²¹ А. М. Бонч-Бруевич, Я. А. Имас и др., ЖТФ, 36, 1269 (1966).

* Элементы прямоугольного сечения из неодимового стекла впервые применялись (правда, по соображениям несколько иного плана) в работах А. М. Бонч-Бруевича и др. (²⁰, ²¹).