

## РЕЗОНАТОРЫ

## Определение положения оси излучения лазера с неустойчивым резонатором

В.Я.Агроскин, Б.Г.Бравый, Г.К.Васильев, В.И.Гурьев, В.Г.Карельский, С.А.Каштанов, Е.Ф.Макаров, С.А.Сотниченко, Ю.А.Чернышев

*Проведено численное моделирование распространения лучей юстировочного лазера в лазере с неустойчивым резонатором и показано, что ось расширившегося пучка даже при разъюстировках резонатора до 30" совпадает с осью пучка основного излучения лазера с точностью не хуже 1". Эксперименты по определению положения оси излучения мощного импульсного химического лазера с неустойчивым резонатором при различных разъюстировках резонатора подтвердили результаты расчетов.*

**Ключевые слова:** неустойчивый резонатор, отверстие связи, ось излучения, юстировка.

Использование в экспериментальной практике неустойчивых резонаторов началось, по-видимому, с пионерской работы А.Е.Siegman [1], опубликованной в 1965 г. В результате последовавшего за этим бурного развития как экспериментальных, так и теоретических исследований были выяснены основные свойства такого типа резонаторов (см., напр., [2]). Все это время, вплоть до наших дней, вопросы юстировки неустойчивых резонаторов привлекали к себе большое внимание (см., напр., [3–6]). Одним из основных преимуществ применения неустойчивого резонатора в мощных лазерных системах с большим объемом активной среды является значительно меньшая достигаемая угловая расходимость излучения по сравнению с таковой для других типов резонаторов. При этом, в силу малой расходимости излучения, существенно возрастают требования к привязке оси излучения лазера с неустойчивым резонатором к пространственной системе координат. Очевидно, что такая привязка должна обеспечивать определение положения оси излучения с точностью до малой доли угловой расходимости лазерного излучения. А этой задаче, очень важной с точки зрения практических применений, уделялось мало внимания. Отметим работу [7], в которой вскользь упоминается возможность использования рассматриваемой там же схемы юстировки для определения положения оси излучения. В последнее время в связи с более широким применением лазеров (при зондировании, диагностике и в медицине) вопросам наведения пучка уделяется большое внимание (см., напр., [8, 9]), но для неустойчивого резонатора с учетом его специфики задача прецизионного определения положения оси излучения, на наш взгляд, требует дальнейшей проработки.

В.Я.Агроскин, Б.Г.Бравый, Г.К.Васильев, В.И.Гурьев, С.А.Каштанов, Е.Ф.Макаров, С.А.Сотниченко, Ю.А.Чернышев. Институт проблем химической физики РАН, Россия, Московская обл., Ногинский р-н, 142432 Черноголовка, просп. Акад. Семенова, 1; e-mail: bgbrav@icp.ac.ru

В.Г.Карельский. АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Россия, 111024 Москва, ул. Авиамоторная, 53

Поступила в редакцию 1 марта 2017 г., после доработки – 23 июня 2017 г.

Для телескопического неустойчивого резонатора, а именно телескопические резонаторы используются в мощных лазерах с большими объемами активной среды, осью излучения является линия, проходящая через центры кривизны обоих зеркал. Если эта линия проходит через центры зеркал и ось активной среды, а при этом еще и фокусы зеркал совпадают, то мы имеем дело с идеально съюстированным резонатором. Наклоним теперь слегка одно зеркало (или оба), но так, чтобы линия, соединяющая центры кривизны зеркал, т.е. ось излучения, лишь немного сместилась от линии, соединяющей центры зеркал, и от оси активной среды. При этом резонатор как система из двух зеркал останется съюстированным, и характеристики лазера (энергия, расходимость) практически не изменятся [2], за исключением положения оси излучения. Из этих рассуждений следует, что при известном положении оси излучения юстировка телескопического резонатора необходима лишь для приемлемого совпадения осей излучения и активной среды. Настоящая работа и посвящена вопросам точного определения положения оси излучения и юстировки телескопических резонаторов.

Аналогично [7] для этого будет использоваться схема многократных отражений от зеркал резонатора расширяющегося светового пучка, который поступает в резонатор через отверстие малого диаметра на оси вогнутого зеркала (рис. 1). После нескольких проходов по резонатору пучок расширится до размеров, определяемых апертурой активной среды (или апертурными диафрагмами), и на экране можно будет увидеть более или менее равномерно освещенное кольцо. Если вместо экрана использовать коллиматор, установленный на оси лазера, то можно наблюдать угловое смещение пучка, вышедшего из резонатора, относительно оси коллиматора.

На первом этапе экспериментов необходимо было определить допустимый размер отверстия в вогнутом зеркале, при котором отверстие не влияло бы на характер

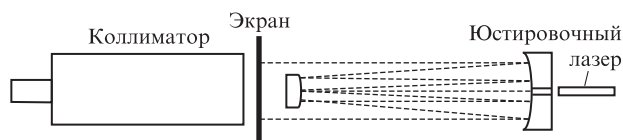


Рис. 1. Схема расположения юстировочного лазера.

ристики излучения лазера. Это было сделано путем измерения расходимости излучения и его энергии при изменении диаметра отверстия в вогнутом зеркале. Отверстия имитировались с помощью непрозрачных экранов, которые располагались непосредственно вблизи вогнутого зеркала. Отметим, что все экспериментальные и расчетные данные, приведенные в настоящей работе, относятся к импульсному химическому DF-лазеру с апертурой 100 мм и телескопическим резонатором с увеличением  $M = 3$  и расстоянием между зеркалами  $L = 245$  см. Измерение расходимости осуществлялось с помощью сферического зеркала с фокусным расстоянием 18 м и камеры Ругосам-III. Результаты измерения расходимости (т.е. полного угла, в котором содержится половина энергии излучения лазера) в зависимости от диаметра экрана представлены на рис.2.

Из самых общих соображений о развитии генерации в телескопическом резонаторе следует, что отверстие на оси вогнутого зеркала с диаметром, меньшим или порядка диаметра 1-й зоны Френеля  $d_F = 2\sqrt{\lambda L} = 6.2$  мм и, естественно, гораздо меньшим диаметра выпуклого зеркала, не должно сказываться на характеристиках излучения. Из рис.2 видно, что резонатор «чувствует» даже отверстия с диаметром  $d$ , в три-четыре раза меньшим диаметра зоны Френеля, а линейный рост расходимости в зависимости от диаметра отверстия начинается примерно с  $d = 3$  мм ( $0.5d_F$ ). Интересно отметить следующее: минимальная расходимость в эксперименте в 1.7 раза больше расходимости для идеального резонатора, в то время как угловой диаметр первого темного кольца в картине распределения интенсивности излучения в дальней зоне превышает аналогичный диаметр для идеального резонатора в 1.04 раза, т.е. они практически совпадают. На наш взгляд, это может быть связано с мелкомасштабным рассеянием на окнах лазерной кюветы и зеркалах резонатора. Возвращаясь к результатам, представленным на рис.2, можно сделать вывод, что отверстие на оси вогнутого зеркала с  $d = 1.5-2$  мм вполне допустимо. Отметим также, что наличие отверстий диаметром до 11 мм не сказывается на энергии генерации лазера.

Вернемся к схеме юстировки (рис.1) и начнем с численных экспериментов, в которых пучок излучения юстировочного лазера (ЮЛ) моделировался большим (не менее  $10^6$ ) набором лучей, распределенных по углам и по апертуре ЮЛ в соответствии с заданными значениями расходимости и апертуры ЮЛ. Прохождение лучей через

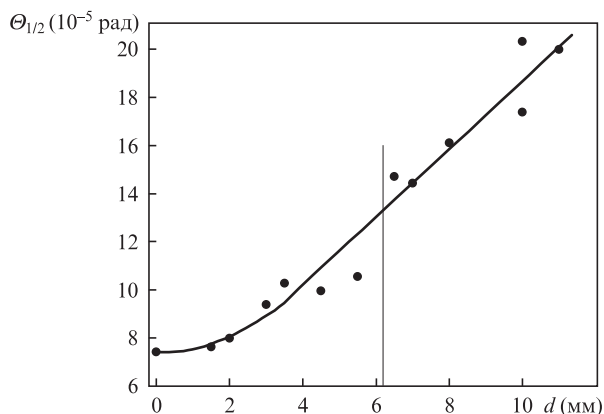


Рис.2. Зависимость расходимости излучения лазера  $\Theta_{1/2}$  от диаметра отверстия (экрана)  $d$  в вогнутом зеркале. Точки – эксперимент, сплошная кривая – аппроксимация, вертикальная линия указывает диаметр 1-й зоны Френеля.

резонатор рассчитывалось в рамках геометрической оптики. В результате расчета определялось распределение плотности лучей (интенсивности) на экране или в фокальной плоскости коллиматора. Во всех проведенных расчетах использовались следующие параметры: диаметр пучка лазера 1.5 мм, его расходимость  $10^{-3}$  рад, диаметр отверстия в зеркале 2 мм, фокусное расстояние и диаметр вогнутого зеркала 3690 и 100 мм, фокусное расстояние и диаметр выпуклого зеркала 1230 и 33 мм, расстояние между зеркалами 2460 мм (фокусы совпадают); эти параметры резонатора соответствуют коэффициенту увеличения  $M = 3$ . В качестве примера на рис.3 приведены результаты расчета идеально съюстированного резонатора в случае ЮЛ, помещенного точно на оси резонатора (и по направлению распространения излучения, и по поперечным координатам). Коллиматор установлен таким образом, чтобы центр фокального пятна располагался в перекрестье коллиматора. Наличие крыльев в распределении интенсивности засветки в фокальной зоне коллиматора связано с тем, что лучи ЮЛ в зависимости от начального угла наклона луча к оси резонатора выходят из резонатора после разного числа проходов, формируя тем самым группы с неодинаковыми угловыми распределениями.

Рассмотрим влияние неточности установки ЮЛ в ситуации, когда резонатор идеально съюстирован. Расчеты показали, что углы наклона ЮЛ к оси резонатора до  $60''$  и поперечные смещения лазера до 0.3 мм обуславливают изменение угла наклона оси широкого пучка до  $0.5''$ . Следует отметить, что так «неудачно» установить ЮЛ с параллельным контролем картины засветки экрана практически невозможно, т.к. это приводит к явно несимметричной засветке (рис.4).

Такая слабая чувствительность положения выходного пучка к погрешностям в установке ЮЛ объясняется тем, что смещение луча ЮЛ от оси при каждом полном обходе резонатора увеличивается в  $M$  раз и при этом, самое главное, также в  $M$  раз уменьшается угол между лучом и осью. Три-четыре полных обхода резонатора – и влияние неточности установки ЮЛ на угол наклона выходного пучка снижается: он уменьшается в 27–81 раз.

Теперь перейдем к разъюстировкам собственно неустойчивого резонатора. Выше уже упоминалось, что для телескопического резонатора осью излучения является

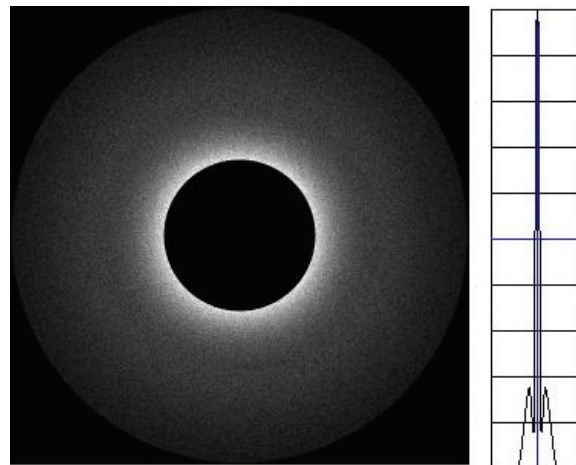


Рис.3. Пример расчета интенсивности засветки экрана (слева) и ее распределение в фокальной зоне коллиматора (справа; сторона клетки по горизонтали соответствует  $10''$ ).

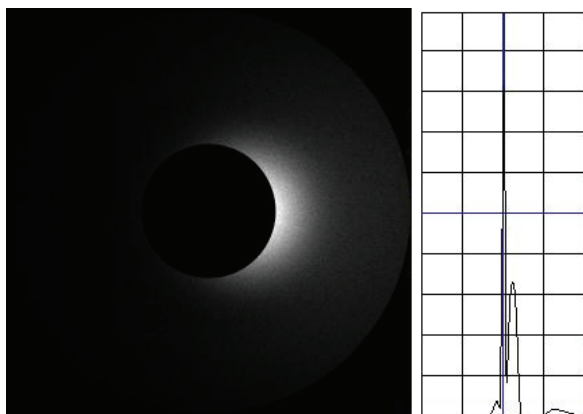


Рис.4. Пример расчета интенсивности засветки экрана (слева) и ее распределение в фокальной зоне коллиматора (справа; сторона клетки по горизонтали соответствует 10") при наклоне ЮЛ к оси резонатора на угол 60".

линия, проходящая через центры кривизны обоих зеркал. Исходя из этого легко показать, что угол между осью излучения неустойчивого резонатора и линией, соединяющей центры зеркал (базовой линией), есть

$$\psi = \frac{2(\beta M - \alpha)}{M - 1}, \tag{1}$$

где  $\beta$  и  $\alpha$  – углы наклона (разъюстировки) к базовой линии вогнутого и выпуклого зеркал соответственно. Зафиксируем вогнутое зеркало, тогда поперечное смещение  $\Delta$  выпуклого зеркала приведет к изменению угла между осью излучения и осью вогнутого зеркала на

$$\Delta F^{-1} M / (M - 1), \tag{2}$$

где  $F$  – фокусное расстояние вогнутого зеркала. Результаты расчетов угла наклона выходного пучка в зависимости от разъюстировки резонатора представлены в табл.1. Смещения 0.25 и 0.75 мм из табл.1 в соответствии с (2) эквивалентны углам поворота выпуклого зеркала 21" и 62.9". Сравнение двух последних колонок в табл.1 показывает, что при угловой разъюстировке до 60" или при поперечном смещении выпуклого зеркала на расстояние вплоть до 0.75 мм угол между осью выходящего из резонатора пучка ЮЛ и осью излучения не превышает 1.5".

Следует отметить, что так «неудачно» ( $\alpha, \beta \approx 60''$ ) съюстировать резонатор с параллельным контролем картины засветки экрана практически невозможно, т.к. это приводит к явно несимметричной засветке (рис.5).

Таким образом, размещение ЮЛ за отверстием в вогнутом зеркале позволяет с хорошей точностью юстировать неустойчивый резонатор и, что гораздо важнее, с

Табл.1.

Угол наклона выпуклого зеркала (")	Поперечное смещение выпуклого зеркала (мм)	Угловое смещение оси излучения (расчет по формулам (1) и (2)) (")	Угловое смещение выходного пучка (расчет по большому набору лучей ЮЛ) (")
5	0	5	4.7
20	0	20	19.3
60	0	60	58.7
0	0.25	21	20.7
0	0.75	62.9	61.4

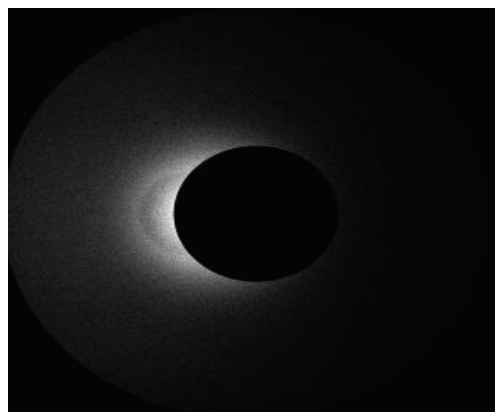


Рис.5. Засветка экрана при наклоне выпуклого зеркала на угол 60".

точностью до угловой секунды «показывать» положение оси излучения неустойчивого резонатора.

Из формул (1) и (2) следует, что ось излучения не привязана ни к одному из зеркал резонатора и определяется их взаимным расположением. Определить положение оси излучения помогает тот факт, что ось расширившегося по сечению в результате многих проходов через резонатор пучка излучения ЮЛ с высокой точностью совпадает с осью излучения лазера. Это совпадение объясняется физикой генерации и развития излучения в лазере с неустойчивым резонатором: излучение из приосевой области за несколько проходов через резонатор заполняет все его сечение, как и излучение ЮЛ.

Для проверки заявленной точности совмещения осей были проведены соответствующие измерения с использованием импульсного химического DF-лазера, оптическая схема которых представлена на рис.6. Эта схема предна-

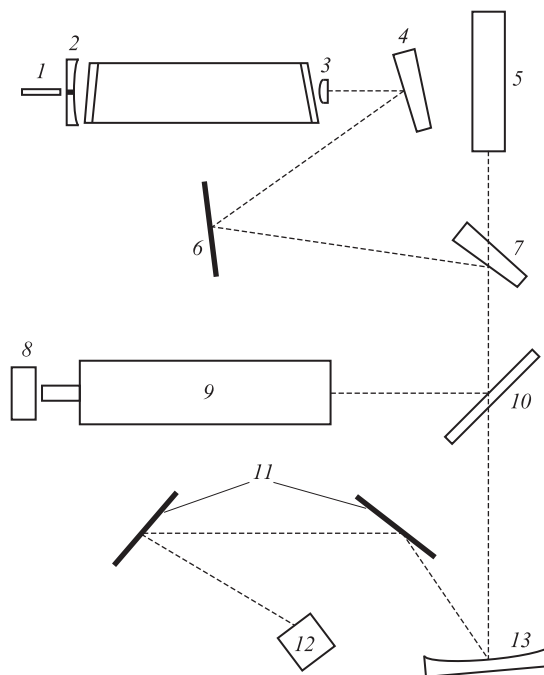


Рис.6. Оптическая схема измерений:

1 – ЮЛ; 2 – вогнутое зеркало резонатора; 3 – выпуклое зеркало резонатора; 4 – клин; 5 – источник коллимированного излучения; 6 – плоское зеркало; 7 – клин; 8 – ПЗС-камера; 9 – коллиматор; 10 – плоскопараллельная пластина; 11 – плоские зеркала; 12 – матричный приемник Ругосам-III; 13 – сферическое зеркало.

значена для прохождения трех оптических пучков излучения.

Пучок А – собственно ИК излучение лазера. Оно выходит из неустойчивого резонатора (зеркала 2 и 3), отражается от передней поверхности клина 4 из  $\text{CaF}_2$ , от плоского медного зеркала 6 и от передней поверхности клина 7 из  $\text{CaF}_2$ , проходит через плоскопараллельную пластину 10 из  $\text{CaF}_2$ , отражается от сферического зеркала 13 с фокусным расстоянием 18 м и от двух плоских зеркал 11 и попадает на приемник Ругосат-III. Зеркала 11 нужны для того, чтобы набрать необходимое расстояние от сферического зеркала до матрицы приемника Ругосат-III, а отражения пучка от оптических клиньев нужны для ослабления ИК излучения лазера.

Пучок Б – коллимированное излучение источника 5 с длиной волны 0.63 мкм и диаметром пучка 50 мм. Оно проходит через клин 7, часть его (6%) отражается от плоскопараллельной пластины 10 в коллиматор 9, в фокусе (1000 мм) которого располагается ПЗС-матрица (Spigicon SP620U) 8, а оставшаяся часть (94%) распространяется по пути ИК излучения.

Пучок В – излучение юстировочного He-Ne-лазера 1 с диаметром пучка около 2 мм. Оно заводится на ось резонатора и после трех-четырех проходов выходит из резонатора в виде кольца с диаметрами 33 и 100 мм. Это излучение после отражения от элементов 4, 6, 7 и 10 попадает в коллиматор.

Основная идея предложенной схемы заключается в следующем. Оси пучков А и В, как показывают приведенные выше расчеты, совпадают с высокой точностью, но это требует экспериментальной проверки. Матрица приемника Ругосат-III «не чувствует» юстировочного пучка излучения В, ослабленного двумя клиньями. Вместо него на Ругосат-III посылается неослабленное излучение коллимированного источника (пучок Б), а с помощью коллиматора с ПЗС-матрицей можно точно измерить угол между осями пучков Б и В. В идеальном случае углы между осями пучков Б и В должны быть равны углам между осями пучков А и Б. Результаты измерений представлены на рис.7. Отметим, что самые большие углы, отложенные по оси абсцисс, специально задавались разъюстировкой резонатора. В этом случае, как следует из проведенных расчетов, углы между осями пучков могут не совпадать на  $\sim 2''$ . У нас же среднее расстояние от экспериментальных точек до прямой, соответствующей равенству углов, составляет  $0.9''$  при дисперсии  $5.9''$ . Мы связываем такой разброс с тем, что при сборке оптической схемы нам не удалось полностью удовлетворить требованиям к прове-

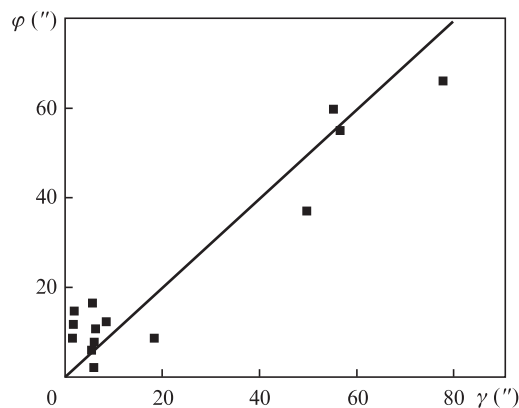


Рис.7. Зависимость угла  $\varphi$  между осями пучков А и Б от угла  $\gamma$  между осями пучков Б и В. Точки – эксперимент, прямая линия соответствует равенству углов.

дению экспериментов по измерению углов с погрешностью не более  $1''$ : жесткие юстировки многочисленных габаритных оптических элементов и угловая стабильность излучений лазеров (пучков Б и В).

Отметим, что рассматриваемая схема определения положения оси излучения лазера с неустойчивым резонатором легко встраивается в любую систему наведения, задающую визирную линию.

Таким образом, расчетным путем и экспериментально показаны преимущества рассмотренной схемы юстировки, позволяющей с хорошей точностью юстировать неустойчивый резонатор и, что гораздо важнее, с точностью до угловой секунды «показывать» положение оси излучения лазера с неустойчивым резонатором даже в случае неидеальной юстировки резонатора.

Настоящая работа выполнена по Госзаданию (проект № 01201361840).

1. Siegman A.E. *Proc. IEEE*, **53**, 277 (1965).
2. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения* (М.: Наука, 1979).
3. Ковальчук Л.В., Свенцицкая Н.А. *Квантовая электроника*, № 5, 80 (1972) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **2** (5), 450 (1972)].
4. Hanlon J., Aiken S. *Appl. Opt.*, **13**, 2461 (1974).
5. Fu S., Long X., Mao H., Hu Y. *Opt. Lasers Eng.*, **49**, 1436 (2011).
6. Wei-yan R., Hui W., Lei C., Song-qing Z., Zheng Z., Pu-bo Q. *Proc. SPIE*, **9671**, 967128 (2015).
7. Купренюк В.И., Рыбалко И.О., Шебанов Б.А., Шерстобитов В.Е. *Оптико-механическая промышленность*, **9**, 3 (1976).
8. Amediek A., Wirth M. *Remote Sens.*, **9** (1), 56 (2017).
9. Gibson A. *Proc. SPIE*, **4034**, 165 (2000).