

09;12

## **Моделирование перекрестно-желобкового резонатора в восьмимиллиметровом диапазоне длин волн**

© Ф.Ф. Барышников, Г.А. Богатова, Г.Д. Богомолов,  
В.В. Завялов, В.А. Ипатов, А.И. Клеев, В.В. Перебейнос,  
Н.В. Чебуркин, Е.Ю. Шампаров

ГП ОКБ "Гранат", Москва  
Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва

Поступило в Редакцию 31 марта 1998 г.

Описаны результаты опытов по масштабному моделированию перекрестно-желобкового квазиоптического резонатора. Продемонстрирована возможность возбуждения высокодобротных мод с кольцевой структурой на зеркале и максимумом поля в центре резонатора.

Для инфракрасных лазеров на свободных электронах высокой средней мощности (10–100 kW и больше) были предложены перекрестно-желобковые квазиоптические резонаторы [1]. Особенностью резонатора является то, что его основное колебание азимутально-симметрично, ограничено каустиками и сфокусировано вблизи центральной части резонатора, но в отличие от резонаторов со сферическими зеркалами имеет кольцевое распределение поля на зеркалах. Поэтому отверстия в центре зеркал должны слабо возмущать это колебание и через них можно провести осевой электронный пучок для взаимодействия с полем в резонаторе. Замена резонатора со сферическими зеркалами в мощном лазере на свободных электронах [2] на перекрестно-желобковый резонатор может, в частности, упростить электронный вывод излучения [3,4] и, кроме того, из-за увеличения площади, занимаемой полем на зеркале, снизить удельную тепловую нагрузку на зеркала.

Качественная картина формирования полей в перекрестно-желобковых резонаторах описана в работах [5,6], а в работах [7,8,9] характеристики собственных колебаний проанализированы теоретически и численно. В данном кратком сообщении содержатся предварительные ре-

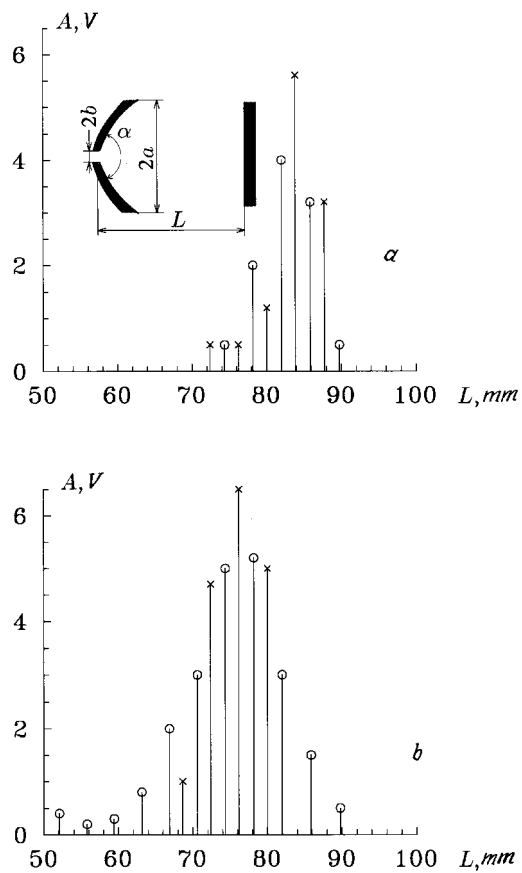
зультаты экспериментального моделирования колебаний в перекрестно-желобковых резонаторах.

Экспериментальное исследование оптических резонаторов на макете в натуральную величину затруднительно, так как изготовление такого макета зачастую не проще изготовления рабочего резонатора. Кроме того, в инфракрасном диапазоне сравнительно сложно создать приборную базу таких исследований (перестраиваемые источники излучения, приемники и т.д.).

Возможным способом решения этой проблемы является масштабное моделирование, основанное на известных законах подобия [10]. В том случае, когда характерные размеры системы много больше длины волны, а поперечные размеры много меньше продольных, характеристики собственных колебаний полностью определяются некоторыми безразмерными параметрами. В частности, при расчетах собственных колебаний в [9] использованы следующие безразмерные параметры:  $c = ka^2/2L$  — параметр Френеля;  $g = 1 - (2L/R)$  — параметр кривизны;  $\beta = (4L/a) \operatorname{ctg}(\alpha/2)$  — параметр излома поверхности зеркала на оси;  $\tau = b/a$  — относительный размер отверстия в центре зеркала. Физические параметры резонатора:  $\lambda = 2\pi/k$  — рабочая длина волны;  $L$  — расстояние между зеркалами резонатора;  $R$  — радиус кривизны зеркала;  $\alpha$  — угол "излома" поверхности зеркала ПЖР на оси;  $2a$  — диаметр зеркала;  $2b$  — диаметр отверстия в центре зеркала (вставка на рис. 1, а).

Для осуществления масштабного моделирования важно, что безразмерных параметров всего четыре, в то время как физических параметров — шесть. Таким образом, задание безразмерных параметров оставляет свободными два физических параметра, что позволяет, в частности, как перейти в область частот, максимально удобную для проведения измерений, так и выбрать приемлемые размеры резонатора.

Характеристики перекрестно-желобкового резонатора измерялись в восьмимиллиметровом диапазоне на установке, блок-схема которой подобна описанной в [11]. Модельный резонатор был образован вогнутым и плоским зеркалами (вставка на рис. 1, а). Вогнутое зеркало диаметром 118 mm и радиусом кривизны 170 mm было выточено из латуни со смещением центра кривизны от оси точения на 40 mm. Угол "излома" зеркала в центре составлял  $76.4^\circ$ . Плоское зеркало диаметром 100 mm было заведомо больше рассчитанного размера каустики основного колебания.



**Рис. 1.** Спектры ПЖР:  $a$  — с поглотителем;  $b$  — без поглотителя. Частота возбуждения 43.1 GHz; ○ — колебание  $00q$ , × — колебание  $11q$ , колебания высших типов на спектрах не отражены.

Вогнутое зеркало на оптической юстировочной головке было укреплено на столике горизонтального оптического компаратора, перемещение которого с точностью  $5 \mu\text{m}$  измерялось оптическим микроскопом. К неподвижной части компаратора вертикально крепилось круглое плоское зеркало. Резонатор возбуждался волноводом через отверстие

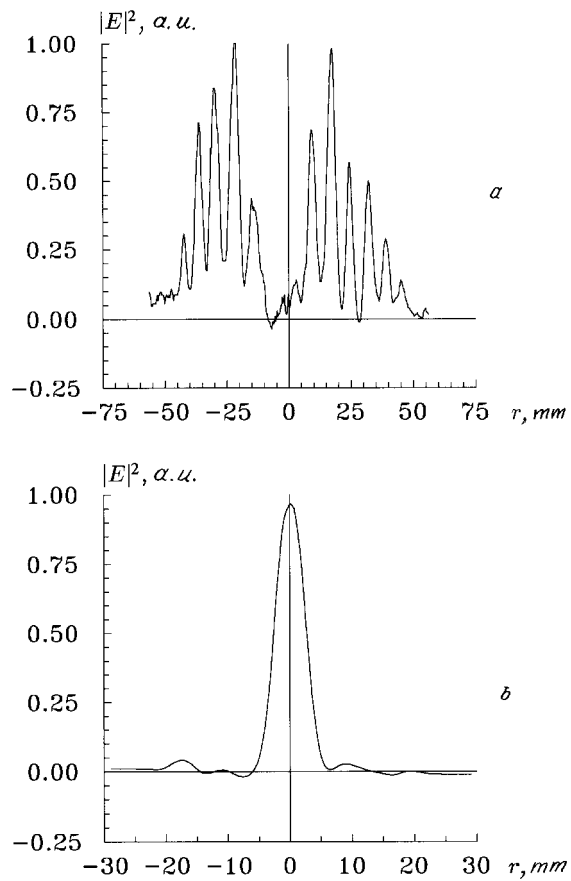
связи в вогнутом зеркале, расположенном в 30 mm от оси резонатора — вблизи максимума поля кольцевого колебания в конфокальной геометрии.

Источником возбуждения служил генератор миллиметрового диапазона с частотной модуляцией. Продетектированные сигналы из резонатора (через центральное отверстие связи в плоском зеркале) и волномера имели вид резонансных кривых и одновременно регистрировались на экране двухканального цифрового осциллографа. Измерения проводились на фиксированной частоте при перемещении вогнутого зеркала. Набор измеренных резонансных длин собственных колебаний  $L_{mq}$  между центром вогнутого и плоским зеркалом определял спектр резонатора. Добротность вычислялась по ширине резонансной кривой, а распределение полей измерялось методом пробного тела [11].

При изменении расстояния  $L$  от 28 до 100 mm наблюдалось несколько десятков резонаторов различной амплитуды. Исследовались только достаточно интенсивные колебания с добротностью  $> 1000$ . Кроме того, не исследовался плотный спектр колебаний, возбуждаемых в "квазизамкнутом" резонаторе (при  $28 < L < 50$  mm), как не представляющий особого интереса.

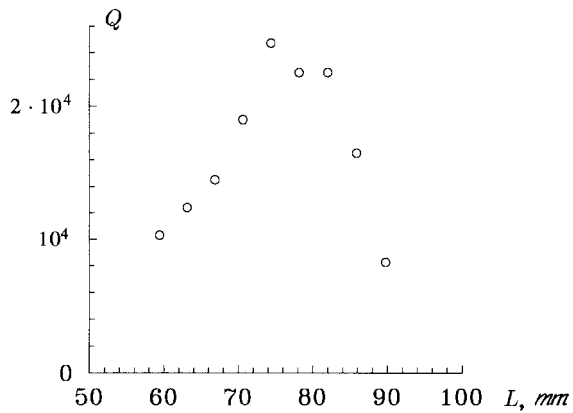
В одном из первых опытов к центральной части вогнутого зеркала был прикреплен конус диаметром 1.5 cm и высотой 1.5 cm из пластилина, хорошо поглощающего в миллиметровом диапазоне длин волн (измеренный коэффициент отражения —  $< 0.1$ ). Наименьшее влияние эта поглощающая вставка, качественно эквивалентная отверстию в центре зеркала, должна оказывать на колебания с провалом поля вблизи центра вогнутого зеркала, а именно на кольцевые колебания и на азимутально-неоднородные колебания с внутренней каустикой. Действительно, спектр колебаний резонатора с поглощающим конусом стал существенно реже и это упростило идентификацию типов колебаний методом пробного тела.

Спектр резонансной структуры с поглотителем представлен на рис. 1, *a* в виде линий, высота которых пропорциональна амплитуде  $A$  сигнала в резонансе, а на рис. 1, *b* — спектр без поглотителя. Кроме основного (кольцевого) колебания  $00q$  ( $q$  — продольный индекс) была исследована также серия резонансов, состоящая из двух близко расположенных колебаний ( $\Delta L < 0.05$ ) mm, одно из которых обладало существенно большей амплитудой. Измерения распределения полей этих колебаний показали, что это — дважды вырожденное азимутально-



**Рис. 2.** Результаты измерения распределения полей основного колебания ПЖР. *a* — вблизи вогнутого зеркала, *b* — вблизи плоского зеркала. Частота возбуждения 43.1 GHz.

неоднородное колебание типа  $11q$  с внутренней каустикой. Из-за неизбежной азимутальной асимметрии резонатора вырождение снимается и оба колебания, поля которых сдвинуты по азимуту на  $90^\circ$ , возбуждаются независимо.



**Рис. 3.** Зависимость добротности колебания  $00q$  от расстояния между зеркалами. Частота возбуждения 43.1 GHz.

Распределение квадрата поля основного колебания, измеренное протягиванием нити с пробным телом поперек оси резонатора на расстоянии около 1 mm вблизи среза вогнутого зеркала, представлено на рис. 2, *a*, а около плоского зеркала — на рис. 2, *b*. Колебательный характер распределения вблизи вогнутого зеркала вызван последовательным пересечением вогнутых фазовых фронтов поля пробным телом. Радиальное распределение поля отражает огибающая этих колебаний.

Результат измерения добротности  $Q(L)$  кольцевых колебаний представлен на рис. 3. Полученная зависимость типична для колебаний, ограниченных внешними каустиками (ср. [11]). При увеличении  $L$  добротность сначала растет из-за уменьшения относительной доли омических потерь на зеркалах, а затем резко падает из-за роста потерь на излучение при приближении внешней каустики к краю зеркала. Относительные потери на излучение при максимальной добротности составляли  $\leq 10^{-3}$ , что совпадает с расчетными оценками [9].

Таким образом, модельный эксперимент продемонстрировал основное свойство перекрестного желобкового резонатора — существование высокодобротных кольцевых мод, имеющих сфокусированное распределение в центральной области резонатора, что служит дополнительным аргументом в пользу применения резонаторов данного типа в мощных лазерах на свободных электронах.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 96-02-17790-а и 96-15-96956).

## Список литературы

- [1] Bogatova G.A., Perebejnos V.V., Cheburkin N.V. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1995. V. A359. N 1-2. P. 61-62.
- [2] Vinokurov N.A., Gavrilov N.G., Gorniker E.I., Kulipanov G.N., Kuptsov I.V., Erg G.I., Levashov Yu.I., Oreshkov A.D., Petrov S.P., Pinayev I.V., Popik V.M., Sedlyarov I.K., Shaftan T.V., Skrinski A.N., Sokolov A.S., Veshcherevich V.G., Vobly P.D. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1995. V. A359. № 1-2. P. 41-43.
- [3] Kulipanov G.N., Litvinenko V.N., Sokolov A.S., Vinokurov N.A. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1991. V. A308. № 1-2. P. 106-108.
- [4] Gavrilov N.G., Kulipanov G.N., Litvinenko V.N., Pinayev I.V., Popik V.M., Silvestrov I.G., Sokolov A.S., Vinokurov N.A., Vobly P.D. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1991. V. A308. № 1-2. P. 109-111.
- [5] Барышников Ф.Ф., Богатова Г.А., Перебейнос В.В. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 16. С. 67-70.
- [6] Vinokurov N.V., Serednyakov S.S. // Proceedings II Asian Symposium on Free Electron Lasers. Novosibirsk. June 13-16, 1995. P. 141-149. 1996.
- [7] Барышников Ф.Ф., Богатова Г.А., Перебейнос В.В., Чебуркин Н.В. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 4. С. 349-352.
- [8] Барышников Ф.Ф., Богатова Г.А., Перебейнос В.В., Чебуркин Н.В. // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 81. № 1. С. 156-163.
- [9] Барышников Ф.Ф., Богатова Г.А., Богомолов Г.Д., Клеев А.И., Перебейнос В.В., Чебуркин Н.В. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 3. С. 230-234.
- [10] Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Советское радио, 1966.
- [11] Богомолов Г.Д. // Электроника больших мощностей. Сб. 3. М.: Наука, 1964. С. 154-175.