

А.П. КОРЕЦКИЙ, академик АН УССР В.П. ШЕСТОПАЛОВ

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА  
ЭЛЛИПСОТОРИЧЕСКОГО ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА

Ранее [1] было показано, что эффективному возбуждению ординарного эллиптического открытого резонатора (ЭОР) препятствует эффект поперечной интерференции, усиливающийся при размещении источника излучения в фокусе эллиптического зеркала. При этом резонатор теряет устойчивость, каустика в нем не образуется и низкая добротность ограничивает практическое использование фокусирующих свойств ЭОР.

Нами предлагается новый тип открытого резонатора эллиптической геометрии, в котором подавляются интерференционные эффекты и возбуждаются добротные электромагнитные колебания с высокими амплитудами и каустиками, обеспечивающими максимальную концентрацию энергии в фокусах эллиптического зеркала. Резонатор представляет собой полусимметричную структуру (рис. 1) из вогнутого 1 и плоского 2 зеркал (возможен также симметричный вариант из двух одинаковых вогнутых зеркал с общей осью  $oz$ ). Отражающая поверхность вогнутого зеркала образована вращением части эллипса с большой полуосью  $a$  и эксцентриситетом  $\epsilon$  вокруг фокальной хорды (ось  $oz$ ). Один из фокусов вогнутого зеркала — кольцевой с диаметром  $4a\epsilon$ , второй — точечный, расположен на оси  $oz$ . Фокусы вогнутого зеркала образуют фокальную плоскость  $f - f$ , с которой совмещена поверхность плоского зеркала. Способ формирования поверхности вогнутого зеркала по аналогии со сфероторическими зеркалами в оптике позволяет называть резонансные структуры такого класса эллипсоторическими открытыми резонаторами (ЭТОР). В настоящее время теоретический анализ волновых процессов в ЭТОР отсутствует. В данном сообщении мы ограничиваемся разработкой лучевой модели и экспериментальным исследованием резонансных свойств ЭТОР.

Траекторный анализ процесса многократных отражений лучей, проведенный в развитие [1] с учетом ширины диаграммы направленности устройства возбуждения, показывает, что ЭТОР может быть интерпретирован системой эквивалентных поверхностей с расположенными на них источниками (волновыми центрами), которые формируют сходящиеся к фокусам фронты волн. К центральному фокусу сходятся фронты волн источников, расположенных на шаровом поясе сферы радиуса  $2a$  с центром в этом же фокусе, к фокусному кольцу (внешние фокусы на рис. 1) — волновые фронты источников, расположенных на поясе тороидальной поверхности, которая образована вращением окружности радиуса  $2a$  с центром, удаленным от оси вращения  $oz$  (в фокальной плоскости) на величину  $2a\epsilon$ ; фазы источников на различных поверхностях сдвинуты на  $\pi/2$ . Замкнутый цикл отражений состоит из 8 чередующихся актов отражения от вогнутого и плоского зеркал, а оптическая длина пути любого луча за время цикла составляет  $8a$ . При этом траектория последующего цикла совпадает с траекторией предыдущего, что согласно [2] отвечает критерию устойчивости резонатора. Существенным в лучевой модели оказывается то, что источники с течением времени не изменяют своего положения на эквивалентных поверхностях. Это коренным образом отличает ЭТОР от ординарного ЭОР, в котором с увеличением числа циклов источники "скатываются" по эквивалентной поверхности к фокальной плоскости эллиптического зеркала, что и обуславливает неустойчивость ЭОР и связанный с ней эффект поперечной интерференции.

В ЭТОР циклическая устойчивость траекторий препятствует образованию интерферирующих потоков энергии. Это резко уменьшает потери и создает условия

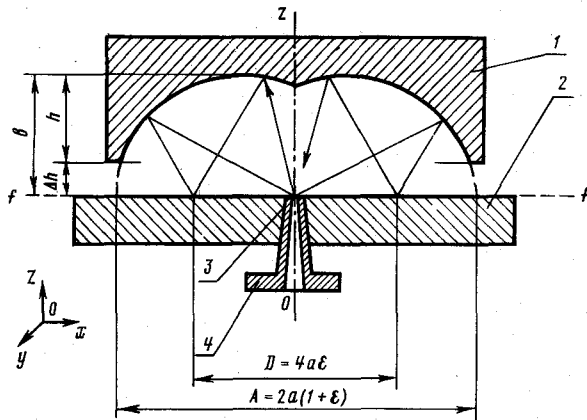


Рис. 1. Общий вид ЭТОР (радиальное сечение) и лучевая траектория одного цикла. Стрелками указаны начальный и конечный участки траектории.  $f$  — след фокальной плоскости;  $\Delta h = b - h$  — вынос фокальной плоскости относительно плоскости апертуры вогнутого зеркала,  $h$  — реальная,  $b = a\sqrt{1 - \epsilon^2}$  — максимальная глубина вогнутого зеркала (равна малой полуоси эллипса)

для формирования каустики, ограниченной обширным участком поверхности вогнутого зеркала (пропорциональным ширине диаграммы направленности источника) и опирающейся на плоское зеркало в местах, локализованных вокруг оптических фокусов вогнутого.

Подавление поперечной интерференции, увеличение оптической длины пути замкнутого цикла и возрастание объема каустики позволяют предположить увеличение добротности и высокую интенсивность поля в фокусах ЭТОР. Эти предположения подтверждаются результатами экспериментальных исследований, проведенными в диапазоне КВЧ на длине волны  $\lambda = 4,00$  мм.

Исследованный ЭТОР содержит плоское квадратное зеркало  $160 \times 160$  мм<sup>2</sup>, в центре которого расположено устройство возбуждения и связи в виде щели 3 сечением  $3,6 \times 0,1$  мм<sup>2</sup> на торце плавно сужающегося по узкой стенке волновода, снабженного присоединительным фланцем 4, и вогнутое эллиптическое зеркало круглой апертуры с расчетными параметрами  $a = 25$  мм,  $\epsilon = 0,5$  и диаметром фокусного кольца  $D = 50$  мм, что соответствует максимальной глубине  $b = 21,65$  мм и диаметру апертуры  $A = 75$  мм.

Экспериментальная установка и методика исследований в основных чертах совпадают с [1, 3]. Для разделения входного и выходного сигналов использовался двойной Т-мост.

Основными задачами эксперимента явились определение спектральной зависимости амплитуды и добротности колебаний от расстояния между зеркалами (вдоль оси  $oz$ ) и выяснение конфигураций пятен и амплитудного рельефа полей на плоском зеркале. При визуализации полей методом пробного тела сканирование производилось в плоскости  $xu$  по площади  $100 \times 80$  мм<sup>2</sup>, при снятии амплитудного рельефа пробное тело двигалось по строке длиной 100 мм, пересекающей ось ЭТОР параллельно вектору  $E$  на раскрытие щели связи.

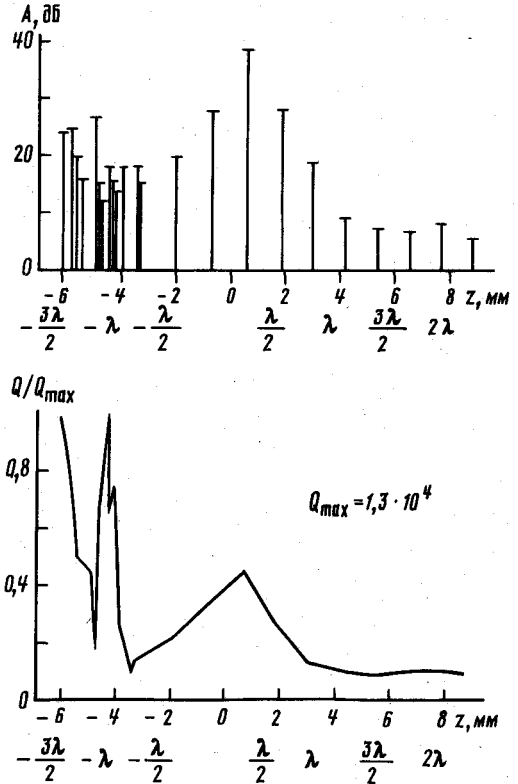
Комплексная спектральная характеристика амплитуд и добротностей колебаний ЭТОР в функции расстояния  $z$  между фокальной плоскостью вогнутого и поверхностью плоского зеркала (рис. 2) свидетельствует о существовании в спектре ЭТОР трех характерных областей, где колебания обладают различными свойствами. Это подчеркивают и приведенные на рис. 3 типичные виды резонансных кривых, пятен полей и амплитудного рельефа колебаний для каждой их трех областей.

Рис. 2. Комплексная спектральная характеристика ЭТОР при  $h = 15,55$  мм в функции расстояния  $z$  между поверхностью плоского и фокальной плоскостью вогнутого зеркала.  $Q_{\max} = 1,3 \cdot 10^4$

Предложенной лучевой модели ЭТОР наиболее хорошо соответствуют колебания, возбуждающиеся в одноволновом фокальном слое (ОФС)  $\Delta z \approx \lambda$ , содержащем фокальную плоскость вогнутого зеркала ( $-2 \text{ мм} \leq z \leq 2 \text{ мм}$ ). Для ОФС характерны максимальные амплитуды и достаточно высокие добротности (до  $6 \cdot 10^3$ ) колебаний при малой спектральной насыщенности. Структура поля колебаний ОФС обладает правильной круговой симметрией и оказывается простейшей в исследуемом ЭТОР (см. рис. 3б). Показательно, что для колебаний ОФС измеренные по средней линии диаметры фокусных колец находятся в очень хорошем соответствии с расчетным  $D = 50 \pm 1$  мм, а амплитуды поля на кольце и в центральном фокусе практически равны. Эти обстоятельства, а также симметрия резонансной

кривой дают основания отнести их к основному типу колебаний и идентифицировать как  $TEM_{02q}$ . Согласно лучевой модели, в ОФС оптические длины пути в всех лучах диаграммы направленности приблизительно равны, траектории лучей попадают на плоское зеркало в малой окрестности фокусов, и распространение лучей, формирующих каустику колебания  $TEM_{02q}$  происходит в соответствии с оптическим принципом Ферма для эллипса. Поэтому совпадение измеренных и расчетных координат максимальной интенсивности указывает на возможность применения принципов лучевой оптики при расчете структуры полей колебаний ОФС для реальных устройств диапазона КВЧ. Удаление поверхности плоского зеркала в любую сторону от ОФС приводит к все более сильному нарушению принципа Ферма, и свойства колебаний ЭТОР существенно меняются. В области  $z < -\lambda/2$ , когда поверхность плоского зеркала находится между поверхностью вогнутого и ОФС, амплитуды спадают до средних, а добротности — до низких значений. С дальнейшим уменьшением  $z$  быстро нарастает спектральная плотность, а величины их добротностей достигают экстремальных значений. Структура поля усложняется, а резонансная кривая приобретает характерный двугорбый вид (рис. 3а). Учитывая проведенный в [4] анализ распространения лучей в замкнутом эллипсе, эти изменения качественно можно объяснить возникновением условий для междутипового взаимодействия, при которых в ЭТОР происходит обмен энергией между основным типом  $TEM_{02q}$  и колебаниями типа "прыгающий мячик", в результате чего поле может занимать значительную часть объема резонатора. Практическое использование колебаний области  $z \lesssim -\lambda$  может быть затруднено из-за высокой спектральной плотности и значительных перепадов добротности.

В области  $z > \lambda/2$ , когда поверхность плоского зеркала расположена по одну сторону от ОФС и поверхности вогнутого, значения амплитуд и добротностей спадают



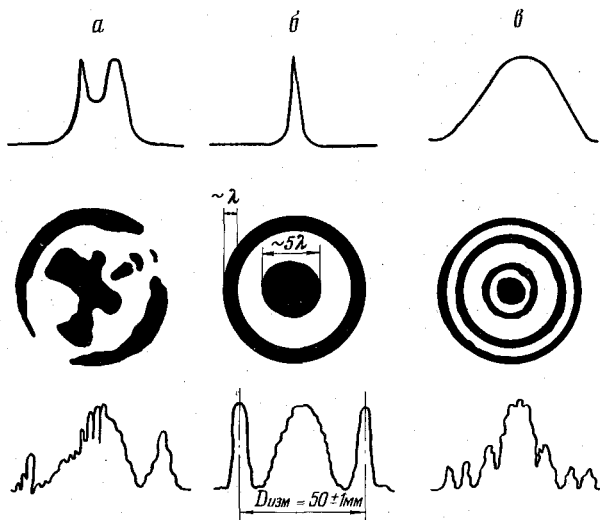


Рис. 3. Типичные резонансные кривые, пятна полей и амплитудный рельеф трех колебаний в трех характерных областях  $z = -3,4$  (а),  $0,63$  (б),  $4,22$  мм (в)

и уже при  $z > \lambda$  становятся малыми. Структура поля на плоском зеркале сохраняет круговую симметрию, однако в ней появляются дополнительные кольцевые зоны (рис. 3в) с интенсивностью, значительно меньшей, чем в центральном пятне, причем их количество растет с увеличением  $z$ . Существование дополнительных кольцевых зон обязано сильной дифракции отраженных плоским зеркалом волна на краях апертуры вогнутого зеркала. С практической точки зрения эта область больших дифракционных потерь ввиду низких амплитуд и добротностей не представляет интереса.

В заключение кратко упомянем о результатах экспериментов по возбуждению исследованного ЭТОР из района фокусного кольца при значениях  $z$  в пределах ОФС. Структура поля в этом случае оказалась аналогичной приведенной на рис. 3б для  $z = 0,63$  мм, а амплитуда и добротность колебаний практически не уменьшились. Следует также отметить, что изменение параметра  $h$  вызывает лишь изменения добротности и спектральной насыщенности. Так, при  $h = 18,55$  мм спектральная плотность возросла в отрицательной области ОФС, а добротность повысилась до  $10^4$ ; при  $h = 13,55$  мм  $Q = 2,3 \cdot 10^3$ , спектр остался разреженным. Амплитуда основного колебания при этом практически не изменилась.

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы о свойствах нового резонатора.

1. ЭТОР представляет собой устойчивую структуру, в которой при малых расстояниях между зеркалами достигается малая спектральная плотность и обеспечивается существование добротных колебаний с высокими амплитудами при возбуждении его из фокусов эллипса.

2. В ЭТОР подавляется эффект поперечной интерференции, вследствие чего он на рабочем участке  $z \lesssim \lambda/2$  обладает малыми потерями.

3. Основным типом колебания в ЭТОР является  $TEM_{02q}$ , обладающий максимальной амплитудой и высокой добротностью. Характерный размер пятна поля  $TEM_{02q}$  в фокальной плоскости вогнутого зеркала с достаточной для практики точностью может быть рассчитан методами геометрической оптики.

4. В пределах рабочего участка  $-\lambda/2 \lesssim z \lesssim \lambda/2$  резонансные свойства ЭТОР мало зависят от расположения источника возбуждения в том или ином фокусе.

5. ЭТОР мало критичен к диаграмме направленности устройства возбуждения.

Нетрадиционные свойства ЭТОР могут быть использованы в различных областях практической радиофизики: в приборах дифракционной и твердотельной электроники, в качестве малогабаритных резонансных ячеек низкотемпературных спектрометров, в устройствах элементной базы диапазона КВЧ. Так как максимальная интенсивность поля и высокая добротность достигается при сравнительно малом осевом размере ЭТОР, он может оказаться перспективным при разработке новых образцов лазерной техники.

Институт радиофизики и электроники  
Академии наук УССР  
Харьков

Поступило  
5 V 1988

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Корецкий А.П., Цык А.И., Шестопапов В.П.* — ДАН, 1987, т. 297, № 4, с. 846–849.
2. *Бабич В.М., Булдырев В.С.* Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн. М.: Наука, 1972. 456 с.
3. *Шестопапов В.П.* Дифракционная электроника. Харьков: Выща школа, 1976. 231 с.
4. *Вайнштейн Л.А.* Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966. 475 с.

УДК 533.9

Ф И З И К А

О.В. ТЕЛЬКОВСКАЯ, В.В. ЯНЬКОВ

### ТРЕХМЕРНАЯ МАГНИТНАЯ САМОИЗОЛЯЦИЯ И СТОХАСТИЧНОСТЬ

(Представлено академиком Б.Б. Кадомцевым 7 XI 1987)

Хорошо известно, что трехмерное локализованное векторное поле с нулевой дивергенцией в случае общего положения плотно заполняет трехмерную область; поведение интегральных кривых при этом стохастично. При наложении дополнительного условия стохастичность может исчезнуть. Так, для стационарных течений идеальной жидкости и магнитогидродинамических равновесий плазмы условие равновесия

$$(1) \quad \text{rot} [\mathbf{H} \text{ rot } \mathbf{H}] = 0$$

приводит (в случае общего положения) к появлению интегральных поверхностей, на которых линии тока осуществляют тороидальные обмотки [1]. Для вырожденного случая

$$(2) \quad \mathbf{H} = C \text{ rot } \mathbf{H},$$

где  $C$  — константа. Арнольдом предложен пример, численное исследование которого Хэноном показало стохастичность по крайней мере в части пространства [1]. Случай более сильного вырождения

$$(3) \quad \text{rot } \mathbf{H} = 0$$

не рассматривался.