

ротности совр. О. р. достигают рекордных цифр во всех достаточно КВ-диапазонах эл.-магн. волн: от 10^6 в диапазоне миллиметровых волн до 10^9 в оптическом.

Моды в О. р. суть волновые пучки, к-рые в квазиоптич. приближении можно представить как поля, распространяющиеся вдоль направления соответствующих геометрооптич. лучей и локализованные в поперечном сечении с плавными (в масштабе λ) огибающими. Поэтому конструирование и расчёты О. р. базируются сначала на рассмотрении характера поведения многократно отражающихся от зеркал геометрооптич. лучей и затем уже на установлении распределения полей, обычно с помощью *Леонтовича* параболического уравнения для комплексных амплитуд. В результате, как и для обычных экраниров. резонаторов, решается задача о собств. ф-циях (модах) и собств. частотах, последние даже при наличии идеальных отражателей в принципе комплексны из-за неустойчивых потерь на излучение.

Различают устойчивые и неустойчивые моды О. р. (впрочем, иногда говорят просто об устойчивости О. р. как таковых). Устойчивой считается мода, «скелетные» геометрооптич. лучи к-рой локализованы внутри каустики, лежащей внутри О. р. На рис. 1 *а* показан «каркас» лучей для первой симметричной моды устойчивого двухзеркального О. р. со сферич. зеркалами с фокусными расстояниями F_1 и F_2 . Каустич. поверхность имеет характер гиперболоида вращения. Она существует, если

$$0 < \left(1 - \frac{L}{2F_1}\right) \left(1 - \frac{L}{2F_2}\right) < 1$$

(L — длина резонатора; фокусные расстояния считаются положительными, если зеркала вогнутые). При невыполнении этого условия двухзеркальный О. р. является неустойчивым. Пример такого О. р. дан на рис. 1 *б*; после многократных отражений лучи вырываются из него, что иногда используется для возбуждения О. р. или для вывода энергии из него (дифракц. вывод излучения — дифракц. связь). Аналогичным образом строятся моды для разнообразных многозеркальных О. р. При этом принципиально различают два класса приборов: в первом, к к-рому, в частности, относятся двухзеркальные комбинации (рис. 1, *а — б*), поле в продольных («лучевых») направлениях имеет характер стоячих волн с масштабом $\lambda/2$; во втором классе приборов — т. н. кольцевых О. р., к к-рым относится, в частности, трёхзеркальный О. р. (рис. 2), — существуют две самостоят. бегущие (вращающиеся) навстречу друг другу моды одинаковых частот. Впрочем, иногда с помощью невзаимных устройств, перепрозраживающих пучок, вырождение этих мод снимается вплоть до формирования одной бегущей волны.

Поперечные вариации мод О. р., ограниченных каустиками, почти всегда имеют характер стоячих волн с сильно растянутой «длинной волны»:

$$L_{\perp} \approx \left(\frac{L_{\parallel}}{k}\right)^{1/2} \approx \left(\frac{\lambda L_{\parallel}}{2\pi}\right)^{1/2},$$

где L_{\parallel} — характерный продольный размер О. р. Спектр собств. частот О. р. зависит от числа продольных и поперечных вариаций поля, отличаемых продольными и поперечными индексами, и имеет разный характер для устойчивых и неустойчивых мод. Так, для устойчивых мод двухзеркального аксиально-симметричного резонатора

$$\omega_{q,m,n} = \frac{c}{L} \left[\pi q + (m + 2n + 1) \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{L}{2F_1}\right) \left(1 - \frac{L}{2F_2}\right)} \right],$$

где q (обычно $\gg 1$), m , n (целые числа) — продольный азимутальный и радиальный индексы соответственно.

Потери на излучение таких мод экспоненциально малы и носят характер туннельного «просачивания» поля от каустики к краю зеркала. При отсутствии дифракции на краях зеркал собств. частоты двухзеркального неустойчивого О. р. с выпуклыми зеркалами определяются соотношением

$$\omega_{q,m,n} = \frac{c}{L} \left[\pi q + i(m + 2n + 1) \operatorname{arccch} \sqrt{\left(1 - \frac{L}{2F_1}\right) \left(1 - \frac{L}{2F_2}\right)} \right],$$

к-рое показывает, что дифракц. потери быстро увеличиваются с ростом поперечных индексов. В общем случае потери на излучение в О. р. определяются безразмерным параметром Френеля $N = a^2/\lambda L$, определяющим число зон Френеля, укладываемых на апертуре зеркала диам. $2a$ (см. *Дифракция света*).

Дифракция на краях зеркал играет определяющую роль в формировании колебаний, находящихся на границе перехода от устойчивых к неустойчивым, к к-рым относятся моды О. р. с плоскими зеркалами. Собств. частоты такого О. р. с круговыми зеркалами равны

$$\omega_{q,m,n} = \frac{c}{L} \left[\pi q + \frac{v_{m,n}^2}{4\pi N} - \frac{0,33v_{m,n}^2}{4\pi N^{3/2}} + i \frac{0,33v_{m,n}^2}{4\pi N^{3/2}} \right],$$

где $v_{m,n}$ — корень ф-ции Бесселя $J_m(x)$. При недостаточном большом коэф. отражения от зеркал и большом параметре Френеля моды с разными поперечными, но одинаковыми продольными индексами вырождаются и О. р. с плоскими зеркалами становится обычным интерферометром Фабри — Перо.

Возбуждение О. р. производится с помощью полупрозрачных зеркал, пластин, а также посредством щелей, отверстий и т. д. Устойчивые О. р. широко применяются в качестве фильтров, спектроанализаторов и волномеров в диапазоне длин волн от оптических до сантиметровых. Они являются естеств. колебат. системами автогенераторов в этих диапазонах — лазеров (см. *Оптический резонатор*), мазеров, оротронов и т. д. В мощных лазерах и мазерах на циклотронном резонансе (гиротронах) часто используются неустойчивые О. р. с дифракц. выводом излучения. Кольцевые резонаторы применяются в лазерных гироскопах. С увеличением эффективности связи О. р. с внеш. линиями передачи селекция типов колебаний — превышение дифракц. потерь нерабочих мод над дифракц. потерями рабочих — уменьшается. Повышение её достигается, как правило, усложнением конструкции О. р. В О. р. различают селекцию поперечных мод, отличающихся друг от друга структурой поля на зеркалах, и селекцию продольных мод, имеющих идентичные поперечные структуры поля, но отличающихся числом полуволн, укладываемых между зеркалами. Селекция поперечных мод основывается на различии в их простр-вств. структурах и достигается ограничением пучков поглощающими диафрагмами, в том числе т. н. мягкими, с плавно увеличивающимся к краю коэф. поглощения, применением профильных зеркал, зеркал с постепенно изменяющимся коэф. отражения, ограничением угл. спектра пучков. Эфф. методом селекции поперечных типов колебаний оказывается применение дифракц. вывода, при этом приходится принимать меры для преобразования получающегося излучения в волновые пучки, обладающие низким уровнем потерь при канализации, высокой направленностью, малым уровнем боковых лепестков. Методы селекции продольных мод основаны на применении диспергирующих элементов: интерферометров Фабри — Перо, призм, дифракц. решёток, связанных резонаторов и т. п.

Лит.: Вайнштейн Л. А., Электромагнитные волны, 2 изд., М., 1988; его же, Открытые резонаторы и открытые волноводы, М., 1966; Техника субмиллиметровых волн, М., 1969; Аианьев Ю. А., Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения, М., 1979.

С. Н. Власов, М. А. Миллер.