

Министерство общего и профессионального образования РФ

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А. Н. ТУПОЛЕВА

Кафедра Радиоэлектронных и квантовых устройств

РУКОВОДСТВО к лабораторной работе № 507

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

Составил: к.т.н. Айбатов Л.Р.

КАЗАНЬ 2010

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучение принципа работы и параметров оптического резонатора.
2. Ознакомление с методикой юстировки оптического резонатора.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Открытые резонаторы.

К настоящему времени приборы квантовой электроники применяются в широком интервале длин электромагнитных волн - от миллиметровых до волн ультрафиолетового диапазона. В радиодиапазоне определяющей характеристикой монохроматического излучения является его частота. Значение частоты задается резонансным контуром. Для длинных волн используют резонансные цепи с сосредоточенными параметрами. Их размеры много меньше длины волны излучения. При переходе к СВЧ в силу резкого укорочения длины волны цепи становятся нестационарными. Поэтому в указанном диапазоне в качестве колебательных систем используют металлические объемные резонаторы, размеры которых сравнимы с длиной волны. Спектр собственных колебаний этих резонаторов сильно разрешен. При дальнейшем увеличении частоты и переходе в субмиллиметровый или ИК диапазоны изготовление объемных резонаторов становится технологически невозможным. Кроме того, добротность таких резонаторов резко падает. Соответственно, необходим переход к резонаторам с размерами, много большими длины волны. В таком резонаторе возможен целый набор направлений распространения излучения. Следовательно, в приборах квантовой электроники резонатор формирует не только частоту осцилляции, но и направление распространения генерируемого излучения, т.е. временные и пространственные его характеристики, оказывающиеся тесно связанными друг с другом. С увеличением частоты резонансные кривые колебаний замкнутой полости начинают перекрываться. А это значит, что объемный резонатор с размерами, много большими длины волны, теряет свои резонансные свойства.

Наиболее перспективным и поэтому получившим наибольшее распространение способом прореживания спектра собственных колебаний резонаторов большого объема при сохранении высокой добротности стало применение открытых резонаторов (ОР). Рассмотрим открытый оптический резонатор, состоящий из двух зеркальных дисков, характеризующихся коэффициентом отражения $R < 1$ и радиусом a , которые установлены на одной оси на расстоянии L друг от друга и ориентированы перпендикулярно этой оси (параллельно друг другу) (рис.1).

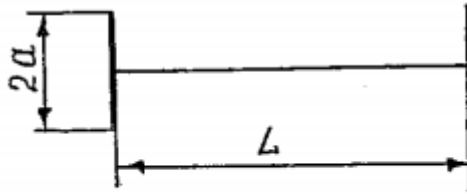


Рис.1. Схема открытого резонатора

Пусть между дисками распространяется система плоских волн. Действие отражающих поверхностей можно рассматривать как увеличение в $1/(1 - R)$ раз пути L , проходимого плоской волной. Соответствующая плоская волна затухает в e раз за $1/(1 - R)$ отражений. Кроме волны, распространившейся строго перпендикулярно к поверхности дисков, в резонаторе могут возбуждаться и другие волны, распространяющиеся почти нормально к поверхности дисков, под некоторым малым углом к оси резонатора. Если такая волна успеет отразиться $1/(1 - R)$ раз прежде, чем выйдет за пределы дисков, то соответствующий ей резонанс обладает добротностью примерно вдвое меньшей, чем в случае нормального распространения. Следовательно, угол $\theta = 2a(1-R)/L$

является предельным углом ограничивающим направление распространения волн в резонаторе, соответствующим колебаниям с высокой добротностью, т.е. наибольшей добротностью обладают те колебания, направление распространения волн которых лежат в телесном угле

$\Omega = \pi \theta^2$. Это приводит к значительному, в $L^2/a^2(1-R)^2 \gg 1$ уменьшению числа собственных колебаний, попадающих в единичный спектральный интервал в случае открытого резонатора по сравнению с резонатором в виде замкнутой полости. Причиной столь сильного прореживания спектра собственных колебаний является отсутствие боковых стенок у открытого резонатора. Таким образом, в диапазоне длин волн от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области спектра используют открытые резонаторы (или оптические резонаторы), рис.1. Рассмотрим схему оптического квантового генератора (ОКГ) (рис.2), состоящего из рабочего вещества 1, расположенного между зеркалами открытого резонатора 2, и источника накачки 3.

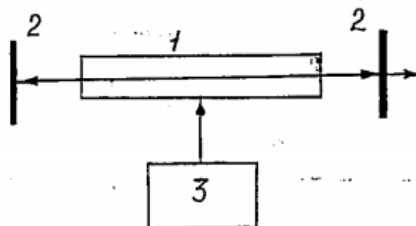


Рис. 2

Источник накачки подводит энергию к рабочему веществу и при том таким образом, что последнее переходит в активное инверсное состояние, т.е. приобретает способность усиливать оптическое излучение в полосе частот соответствующей инвертированному рабочему переходу активных частиц, за счет процессов индуцированного испускания фотонов. Резонатор, вызывая многократное прохождение возникающего оптического индуцированного излучения через активную среду, обуславливает эффективное взаимодействие электромагнитного поля с ней. Т.о.

резонатор обеспечивает положительную обратную связь в результате возвращения части распространяющегося между зеркалами излучения в активную среду. Одно из зеркал делается полупрозрачным для вывода лазерного излучения из резонатора. Кроме того, как отмечалось выше, ОР обеспечивает высокую направленность и монохроматичность генерируемого лазером излучения.

1.2. Моды оптического резонатора

Подобно объемным, открытые резонаторы (ОР) обладают набором собственных типов колебаний, называемых также модами, характеризующихся определенным распределением поля и собственными частотами. Собственные типы колебаний (моды) открытого резонатора представляют собой решения уравнений электромагнитного поля, удовлетворяющие граничным условиям на зеркалах. Существует несколько методов расчета открытых резонаторов позволяющих находить собственные типы колебаний. Строгая и наиболее полная теория ОР дана в работах Л.А.Вайнштейна, наглядный метод расчета типов колебаний в ОР развит в работе А.Фокса и Т.Ли. В ней используется численный расчет, моделирующий процесс установления колебаний различных типов в резонаторе в результате многократного отражения от зеркал. Первоначально задаётся произвольное распределение поля на поверхности одного из зеркал. Затем, применяя принцип Гюйгенса, вычисляют распределение поля на поверхности другого зеркала. Полученное распределение принимают за исходное и вычисление повторяется. После многократных отражений распределение амплитуды и фазы поля на поврежденности зеркала стремится к некоторой стационарной конфигурации, т.е. поле на каждом зеркале само воспроизводится в неизменном виде. Полученные распределения поля представляют собой нормальные типы колебаний (моды) открытого резонатора и обозначаются как колебания типа TEM_{mnp} , символ TEM указывает на то, что волны внутри резонатора близки к поперечным электромагнитным (*Transverse Electromagnetic Modes*), т.е. не имеющих составляющих поля вдоль распространения волны.

Индексы m и n обозначают число изменений направлений поля на поверхности зеркала вдоль его сторон (для прямоугольных зеркал или вдоль радиуса и по углу в пределах $0 \dots \pi$ (для круглых зеркал). На рис.3 показана конфигурация электрического поля для простейших поперечных типов колебаний ОР с прямоугольными и круглыми зеркалами. Интенсивность излучения на границах областей с противоположным направлением поля равна нулю. Поэтому для поперечных типов колебаний в сечении пучка ОКГ видны яркие пятна, разделенные темными областями.

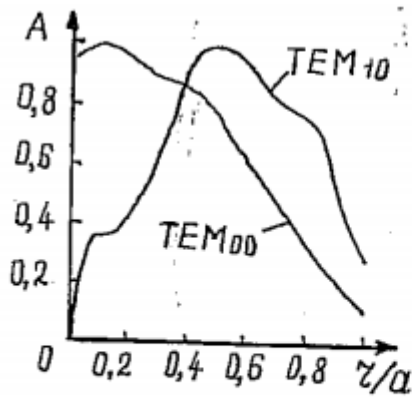


Рис.4. Распределение амплитуды поля на зеркале резонатора

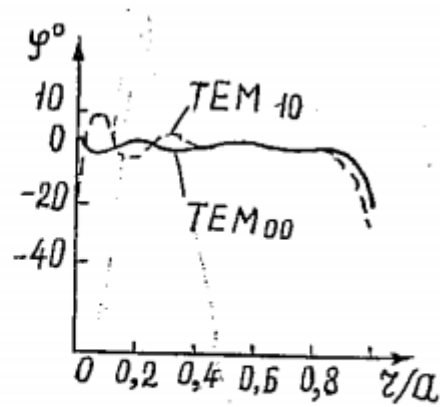


Рис.5. Распределение фазы поля на зеркале резонатора

Видно, что изменение фазы поля на зеркале незначительно (менее 45°), и поскольку размеры зеркал много больше длины волны, то фазовый фронт собственных волн в резонаторе близок к плоскому¹. Характерен значительный спад амплитуды поля к краю зеркала. Чем больше число Френеля' (N), тем меньше амплитуда поля на краю зеркала и тем меньше дифракционные потери мощности. Условием резонанса собственных типов колебаний является равенство полного набегу фазы при прохождении волны между зеркалами целому числу, умноженному на n , т.е.

$$2\pi L n / \lambda m n q + \beta m n q = \pi q, \quad (1)$$

где n - показатель преломления среды, заполняющей резонатор. Первое слагаемое в (I) - это геометрический фазовый сдвиг, определяемый длиной; резонатора, второе слагаемое - дополнительный фазовый сдвиг за проход для волны TEM_{mnq} . - 1

Отсюда для резонансной частоты получаем выражение

$$\gamma_{mnq} = \frac{c q}{2 L n} - \frac{c \beta m n q}{2 \pi L n}, \quad (2)$$

где C - скорость света. Разность частот соседних продольных типов колебаний одного и того же поперечного типа; (т.е. TEM_{mnq} и TEM_{mnq+1}) из выражения (2) равна

$$\Delta \gamma = \gamma_{mnq+1} - \gamma_{mnq} = C / (2 L n). \quad (3)$$

1.3. Конфигурация оптических резонаторов. Устойчивые и неустойчивые резонаторы

Совокупность радиусов кривизны отражающих поверхностей зеркал и расстояния между ними представляет собой определенную конфигурацию открытого резонатора. Конфигурацию резонатора принято задавать двумя обобщенными параметрами

$$q_1 = 1 - L / r_1, \quad q_2 = 1 - L / r_2, \quad (4)$$

где радиусы кривизны отражающих поверхностей. Радиусы вогнутых зеркал считаются положительными, выпуклых - отрицательными. Любая конкретная

конфигурация может быть представлена точкой в системе координат g_1 и g_2 на графике, носящем название G - диаграммы (диаграммы устойчивости)

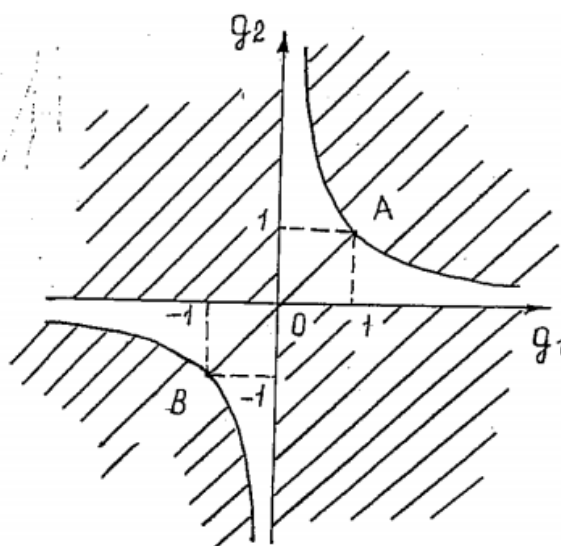


Рис. 6. G - диаграмма

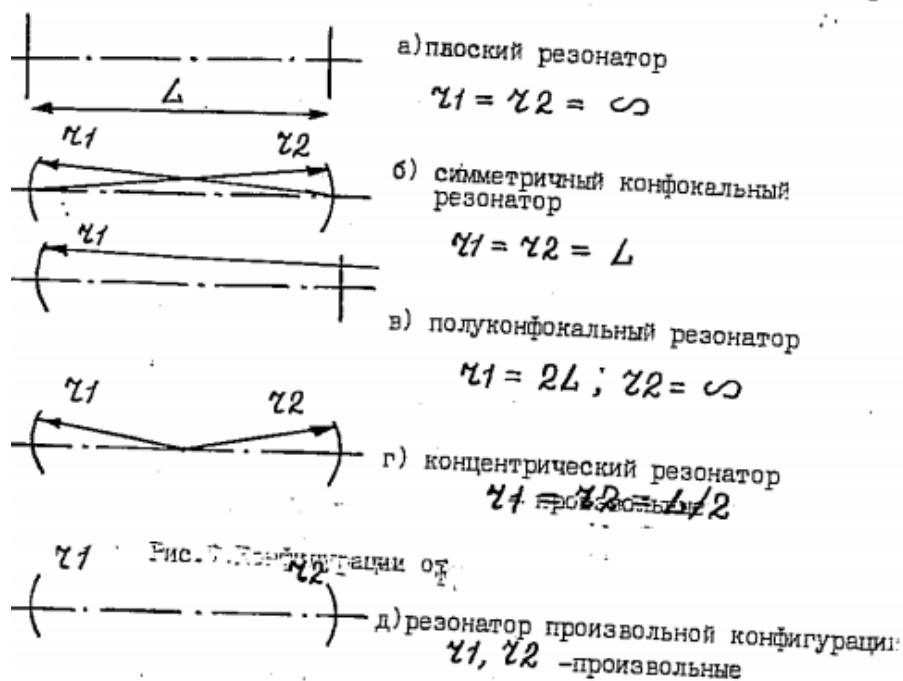


Рис. 7. Конфигурации открытых резонаторов

На G-диаграмме плоский резонатор характеризуется точкой A с координатами (1,1). Симметричный конфокальный резонатор (рис.7) соответствует началу координат - точке 0 (0,0). Прямая AB соответствует совокупности резонаторов с отражающими поверхностями равной кривизны.

В резонаторах лазеров используются зеркальные поверхности различной кривизны - от плоских до сферических с радиусами кривизны порядка длины резонатора. Известны случаи использования не только вогнутых, но и выпуклых зеркал. Применение сферических зеркал позволяет существенно снизить требования к

точности юстировки резонатора. Однако не любая пара зеркальных поверхностей может обеспечить устойчивую работу лазера. В некоторых конфигурациях незначительное отклонение луча от осевого направления приводит к возрастанию этого отклонения после отражения, и луч быстро выходит из резонатора. Такие конфигурации называются неустойчивыми. В резонаторах устойчивой конфигурации луч, отклонившийся от осевого направления, после ряда отражений вновь возвращается в параксиальную область.

Как правило, генерация может возникнуть лишь в резонаторах с устойчивой конфигурацией. Только при очень большом коэффициенте усиления активной среды S в мощных ОКГ) можно получить генерацию в некоторых неустойчивых конфигурациях при технически выгодных условиях. Рассмотрение вопроса в рамках геометрической оптики, что справедливо при факторе Френеля $(N = a^2/\lambda L)$, большем 10, дает резко очерченную границу значений параметров Q , соответствующих устойчивой конфигурации. Условие устойчивости записывается в виде

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1. \quad (5)$$

Условию устойчивости соответствует свободная от штриховки область на рис.6. Если условие (5) не выполняется (заштрихованная область на рис.6), то такой резонатор является неустойчивым. На рис. 8 представлены некоторые схемы неустойчивых резонаторов и ход лучей в них.

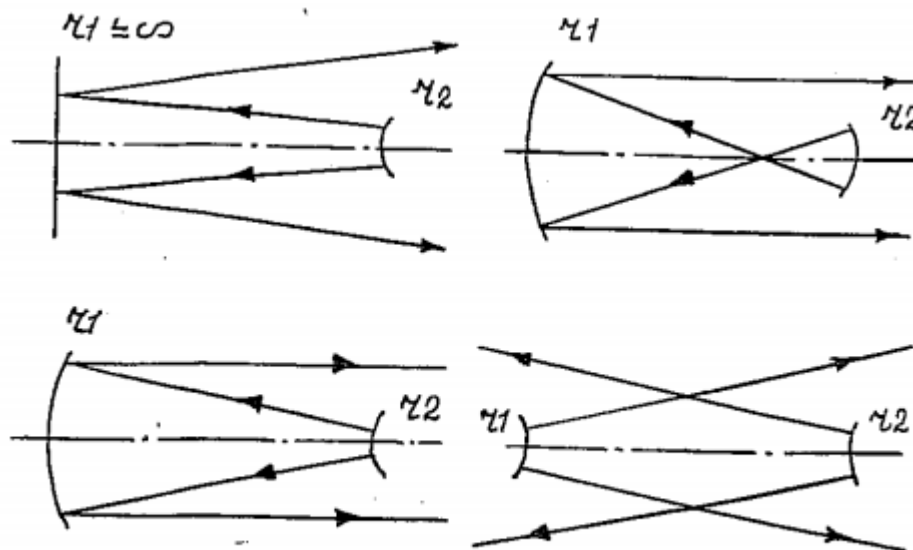


Рис.8. Конфигурации неустойчивых резонаторов

Если одно зеркало перекрывает весь пучок, - то оно является выходным (пучок в последний раз отражается от этого зеркала, а выходное излучение идет в сторону другого зеркала). Одним из характерных отличий неустойчивого резонатора от устойчивого является то, что в первом структура электромагнитной волны устанавливается всего за несколько проходов через резонатор. Поэтому влияние неоднородностей активной среды на параметры излучения для неустойчивого резонатора гораздо меньше.

Другим преимуществом является то, что в неустойчивом резонаторе пучок, имеет больший поперечный размер и поле генерации гораздо лучше заполняет ак-

тивный элемент, что приводит к большему к.п.д. лазера. Увеличение поперечного размера пучка дает возможность уменьшить расходимость излучения.

1.4. Пространственные параметры пучка устойчивого резонатора

Характеристики резонаторов устойчивой конфигурации определяются так называемым конфокальным параметром. В случае симметричного конфокального резонатора это расстояние между зеркалами реального резонатора, а в случае резонатора произвольной конфигурации - расстояние между зеркалами воображаемого симметричного эквивалентного конфокального резонатора, поле которого совпадает с полем данного резонатора. Величина конфокального параметра R_3 определяется по формуле

$$R_3 = 2L \sqrt{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)} / (g_1 + g_2 - 2g_1 g_2) . \quad (6)$$

Энергия излучения лазера с резонатором, образованном двумя сферическими или плоским и сферическим зеркалами, распространяется по криволинейным лучам (гиперболам) (рис.9). Пучок имеет минимальный поперечный размер w_0 (перетяжку) в некотором сечении, где фронт волны плоский. Под размером пучка понимают расстояние от оси пучка до точки, где интенсивность в сечении основной моды падает в e^2 раз. По мере удаления от этой плоскости размеры пучка увеличиваются.

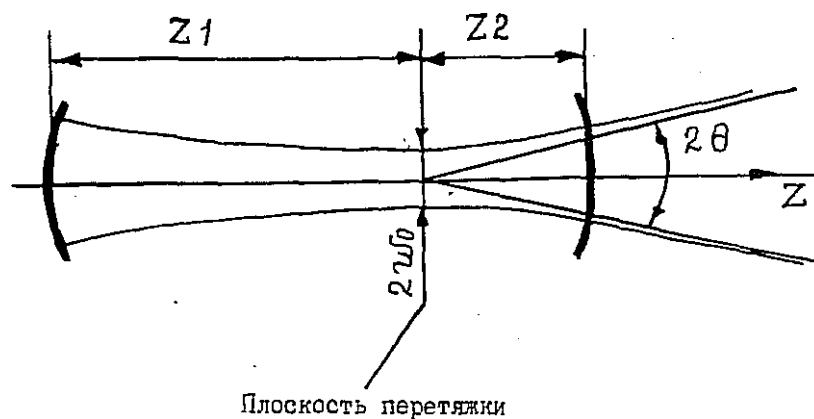


Рис.9 Вид пучка лазера

Положение перетяжки относительно зеркал резонатора определяется как

$$Z_1 = L \frac{g_2(1 - g_1)}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2} , \quad Z_2 = L \frac{g_1(1 - g_2)}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2} . \quad (7)$$

Пространственные параметры пучка резонатора со сферическими зеркалами рассчитывают, пользуясь понятием об ЭКР, центральное сечение которого совпадает с перетяжкой рассматриваемого резонатора. Размер пятна w_0 основной моды TEM_{00} в плоскости перетяжки равен

$$w_0 = \sqrt{\lambda R_3 / 2\pi} . \quad (8)$$

Для радиальных типов колебаний с индексами 1,2,3,4 размер пятна увеличивается соответственно в 1,52; 1,86; 2,12; 2,32 раза. Закон изменения размера пятна по координате Z одинаков для мод всех порядков:

$$w_z = w_{mn} \sqrt{1 + \xi^2}, \quad (9)$$

где $\xi = 2Z/R_3$ относительная координата сечения; w_{mn} - размер пятна в плоскости перетяжки.

Расходимость пучка лазера со сферическими зеркалами для основной моды:

$$\theta_0 = \sqrt{2\lambda/fR_3} = \lambda/f w_0. \quad (10)$$

Для резонатора с плоскими зеркалами расходимость оценивается выражением

$$\theta = K_g \lambda / 2a,$$

где $2a$ - размер апертуры; ($K = 1,22$ при однородном распределении круглой апертуры, $K_g = 1$ в случае прямоугольной апертуры).

1.5.Образование спектра излучения лазера

Расстояние между резонансными частотами ОР для продольных мод определяется выражением (3) в среде с показателем преломления равно $\Delta \nu = c/2L$.

Чтобы определить, сколько резонансных частот будет одновременно существовать в резонаторе, необходимо знать, ширину контура усиления рабочего перехода активной среды ОКГ. Как правило, ширина контура усиления гораздо больше, чем расстояние между соседними частотами резонатора, поэтому спектр излучения будет состоять из нескольких резонансных частот. Спектральные линии излучения будут располагаться по всей ширине рабочего перехода, если уровень накачки обеспечивает условие генерации, посему контуру усиления. Если же усиление будет больше потерь только в определенной области контура линии, то спектр будет иметь вид, показанный на рис. 10.

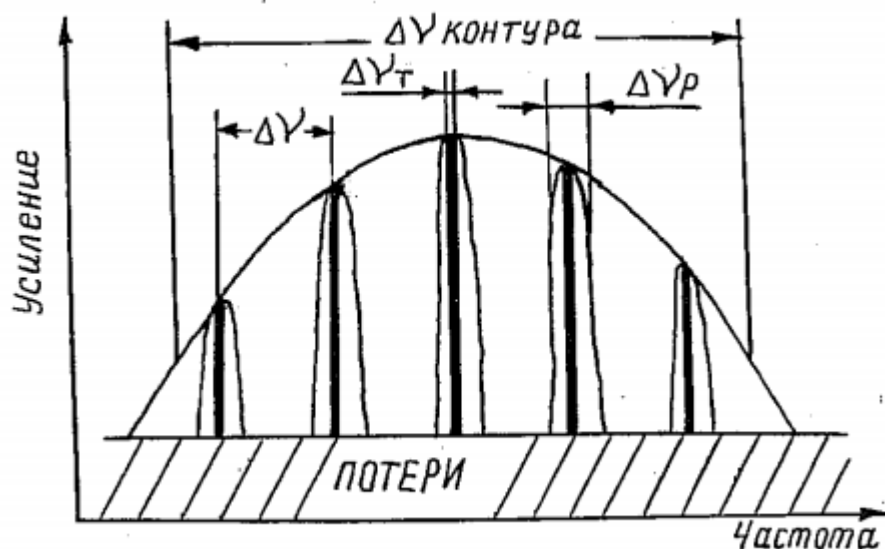


Рис.10.К определению спектра выходного излучения

Спектральная ширина отдельной линии выходного излучения не может быть шире резонансного пика резонатора, определяемого выражением

$$\Delta \nu_p = \nu/Q = \omega_c/(2\pi Q),$$

где Q - добротность резонатора. При малости дифракционных потерь величина α может быть получена равной 0,01. В этом случае ширина резонансного пика резонатора метровой длины будет равна 0,5 МГц. Эта величина меньше естественной ширины линий атомов активной среды (например, для атомов неона ширина линии 16 МГц). Вследствие того, что наибольшее усиление получается в центре резонансного пика спектральная линия сужается еще сильнее (в $\Delta \nu_r$ на рис.10).

Однако вследствие механических нестабильностей, теплового дрейфа, приводящих к нестабильности длины резонатора, действительная чистота спектра в реальных приборах на много порядков хуже предельно достижимой. Кроме собственных типов колебаний с частотами ν_{00q} (рис.10) в резонаторе существуют также колебания с частотами для волн TE_{mnp} , (рис.11). Их положение на оси частот определяется дополнительным фазовым сдвигом за проход β_{mnp} в выражении (I).

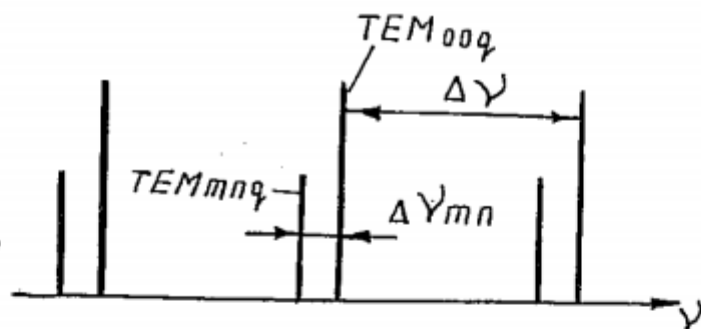


Рис. II. Спектр поперечной моды резонатора

II. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Описание экспериментальной установки.

Схематично вид лабораторной установки приведен на рис. 12.

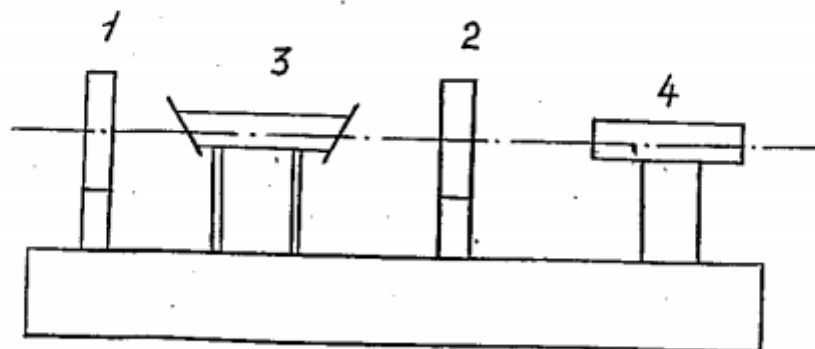


Рис. 12. Схема лабораторной установки

1 - зеркало с коэффициентом отражения 100%, 2 - полупрозрачное выходное зеркало открытого резонатора. 3 - газоразрядная трубка гелий-неонового лазера, 4 - ксировочный гелий-неоновый лазер ЛГ-78.

Газоразрядная трубка 3, выходное зеркало 2, ксировочный лазер 4 снабжены ксировочными приспособлениями, позволяющими изменять их наклон в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Включение установки производится включением тумблера "Сеть" блока питания лазера 4.

ВНИМАНИЕ:

В процессе работы следует:

Избегать попадания лазерного излучения в глаза.

Строго соблюдать порядок работы с высоким напряжением (цепи питания лазера находятся под напряжением до 2 КВ).

Не дотрагиваться до поверхностей зеркал резонатора и окон газоразрядной трубки.

2.2.Задание на выполнение экспериментальной части работы

Х. Практическое ознакомление с юстировкой оптического резонатора

Юстировка заключается в установке зеркал строго перпендикулярно оси резонатора, а также в совмещении оси газоразрядной трубки 3 с осью оптического резонатора. Для юстировки используется гелий-неоновый лазер 4.

Порядок выполнения экспериментальной части.

Осторожно вынуть из оправки выходное зеркало 2, снять газоразрядную трубку 3. Включить юстировочный лазер 4. С помощью котиловочных приспособлений лазера 4, выставить его перпендикулярно зеркалу I. При этом луч должен отразиться точно в центр диафрагмы лазера. В дальнейшем положение котиловочного лазера не изменяется. Установить Газоразрядную трубку 3 и с помощью ее котиловочных приспособлений добиться, чтобы луч ОКГ проходил сквозь нее, не задевая стенок трубки. Осторожно закрепить в оправке выходное зеркало 2 и отъюстировать его таким образом, чтобы луч отражался точно в центр диафрагмы лазера.

Представить преподавателю результаты юстировки резонатора.

2.3. Задание на выполнение расчетной части работы

Пользуясь выражениями (4),(6) - (19), вычислить положение перетяжки, размеры пятна в плоскости перетяжки и на зеркалах, и расходимость излучения для основной моды ТЕМ₀₀ в резонаторе длиной 0,45 м, образованного зеркалами с радиусами кривизны $R_1 = 2\text{ м}$, $R_2 = 1\text{ м}$. Длина волны излучений 0,63 мкм.

III. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1.Что такое открытый резонатор?
- 2.По каким причинам в оптическом диапазоне волн используются открытые резонаторы?
3. Из каких элементов состоит схема ОКГ?
- 4.Назовите назначение этих элементов.
- 5.Назовите методы расчета открытых резонаторов.
- 6.Что такое моды открытого резонатора?
- 7.Что такое поперечные типы колебаний ОР?
- 8.Приведите примеры распределений амплитуды и фазы поля на зеркалах резонатора.
- 9.Каким образом определяются резонансные частоты ОР?
- 10.Привести условие устойчивости открытого резонатора. Что такое G - диаграмма?
- 11.Приведите примеры устойчивых ОР.
- 12.Приведите примеры неустойчивых ОР.
- 13.Каким образом определяются пространственные параметры пучка устойчивого резонатора?
- 14.Что такое перетяжка пучка, расходимость пучка?

- 15.Каким образом формируется спектр излучения лазера?
16.В чем заключается методика юстировки открытого резонатора?

ЛИТЕРАТУРА:

1. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Лань, 2008.- 720 с.
2. Янг М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы. – М.: Мир, 2005. – 541 с.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2006. – 496 с.
4. Гринев А.Ю. и др. Оптические устройства в радиотехнике: Учеб. Пособие для студ. вузов / Под ред. В.Н.Ушакова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Радиотехника, 2009. – 264 с.
5. Малышев В.А. Основы квантовой электроники и лазерной техники: учебное пособие для вузов. – М.: Современный литератор, 2005. – 543 с.