

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра общей физики

**Лабораторный практикум
«Физическая и СВЧ оптика»**

М. И. Захаров
ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР

Методические указания

Новосибирск
2012

Методические указания по выполнению лабораторной работы «Открытый резонатор» состоят из введения, теоретической и экспериментальной частей, приложения и списка использованной литературы. В теоретической части рассмотрены добротность резонатора, разрешающая способность интерферометра Фабри-Перо, а также дифракционные потери и типы колебаний в открытом резонаторе. В экспериментальной части дано описание экспериментальной установки, перечислены задания и контрольные вопросы. В приложении содержатся «Методические указания к использованию измерителя КСВ и ослабления Р2-61».

Автор
канд. физ.-мат. наук М. И. Захаров

Методические указания подготовлено в рамках реализации Программы
развития
НИУ-НГУ на 2009-2018 г. г.

© Новосибирский государственный
университет, 2012.....

Методические указания по выполнению лабораторной работы “Открытый резонатор”

Цель работы – изучение характеристик открытого резонатора (многолучевого интерферометра) и его применение для измерения показателя преломления диэлектриков на $\lambda \sim 3$ см [1].

Введение

Интерференция электромагнитных волн – явление, заключающееся в том, что при наложении двух (или более) когерентных волн в различных точках пространства происходит усиление или ослабление результирующей амплитуды – в зависимости от соотношения между фазами парциальных волн в этих точках. В результате плотности энергии суммарной волны в каждой точке пространства не равна, вообще говоря, сумме плотностей энергии слагаемых волн. Следовательно, интерференцию можно рассматривать как перераспределение в пространстве энергии электромагнитных волн в результате совместного действия источников когерентного излучения.

Известно, что образование интерферирующих волновых пучков (лучей) может происходить двумя способами. При первом способе волна с широким фронтом разбивается на ряд более узких фронтов. Примером интерферометра, основанного на делении фронта волны, является дифракционная решетка. При втором способе происходит деление амплитуды падающей волны. В качестве делителя амплитуды используются, как правило, зеркальные пластинки. Примером устройства, работающего по второму способу, является интерферометр Фабри-Перо. В нем деление амплитуды падающей волны происходит многократно, так что интерференционная картина формируется в результате сложения большого числа когерентных волн с убывающей амплитудой.

Зеркалами интерферометра Фабри-Перо в диапазоне СВЧ могут служить проводящие пластинки с множеством отверстий (обеспечивающих частичную прозрачность этих зеркал), например, сетки или одномерные решетки малого периода [2].

Такие решетки обладают анизотропной проводимостью: электромагнитные волны, поляризованные параллельно проводникам, отражаются от решетки, как от хорошо проводящего зеркала, а волны с перпендикулярной поляризацией проходят через решетку почти без отражения¹.

¹ Это свойство решёток может использоваться для создания интерференционно-поляризационных устройств со специальными спектральными характеристиками (см., например, [3,4]).

Интерферометр Фабри-Перо (ИФП) изобретен еще в конце XIX века и является в настоящее время одним из наиболее распространенных приборов. Так, он широко используется в качестве высокоэффективного устройства в спектральных измерениях [5], как оптический процессор – в системах аналоговой обработки информации [6], в голографии [7], а также как резонатор – в квантовой электронике [8].

ИФП, применяемый в СВЧ - диапазоне, можно рассматривать как открытый (т.е. без боковых стенок) резонатор. Подобные резонаторы используются для измерения диэлектрических (ε) и магнитных (μ) проницаемостей различных веществ (в миллиметровом и примыкающих к нему диапазонах), для диагностики плазмы и т.д. Преимущество внутрирезонаторных методов исследований (в частности, листовых материалов) становится явным, например, когда надо зафиксировать очень малое поглощение или малый сдвиг фазы в образце.

Впервые в технике СВЧ открытые резонаторы-интерферометры применил Кэлшоу [9] для измерения ε и потерь в диэлектриках. Затем ИФП был предложен Прохоровым и др. в качестве открытого резонатора квантовых генераторов [8]. Открытые резонаторы в основном применяются в оптическом и в коротковолновой части СВЧ – диапазона, где другие резонансные системы не обеспечивают высокой добротности. Однако следует подчеркнуть, что резонатор открытого типа может быть применен в любом диапазоне длин волн, необходимо лишь обеспечить достаточно большие (по сравнению с длиной волны) размеры отражающих поверхностей зеркал. Такое устройство, если его использовать, например, в качестве передающей антенны, преобразует электромагнитную энергию, подводимую к нему по волноводу, в направленное излучение, причем преобразование происходит лишь на частотах, соответствующих собственным типам колебаний резонатора.

Вопрос о том, чем считать систему из двух соосных зеркал, установленных на определенном расстоянии друг от друга, – резонатором или интерферометром – достаточно условен. Существуют разные подходы, основанные: на расположении источника энергии по отношению к системе зеркал (внутри или снаружи) [10], на возможности получения резонансов в зависимости от способа возбуждения колебаний (сосредоточенного или распределенного) [11] и др. Можно остановиться на определении, основанном на способе использования данной системы. Если регистрируются смещения интерференционных полос или их искривления, а также иные изменения картины интерференции, обусловленные неоднородным характером распределения показателя преломления в исследуемой среде, то систему естественно рассматривать как многолучевой интерферометр. Если же о параметрах исследуемой

среды, помещаемой в систему, судят по изменению резонансной частоты и добротности, то ее удобно рассматривать как открытый резонатор.

Большой вклад в развитие теории открытых резонаторов, становление которой приходится на 1961 – 1966 г.г., внесли работы российских ученых – В.П.Быкова, В.И.Таланова, Л.А.Вайнштейна и др. [12]. Эффективные и универсальные методы анализа систем оптического и СВЧ диапазонов были разработаны Л.А.Вайнштейном [11], которому удалось получить простые аналитические выражения во многих случаях, когда другие (в частности, американские) исследователи были вынуждены прибегать к машинным расчетам.

Добротность резонатора

При распространении волны между зеркалами интерферометра-резонатора имеют место потери, обусловленные, прежде всего неполным отражением, а также дифракцией (из-за конечных размеров зеркал). Наличие реальных потерь приводит к затуханию колебаний, если на их поддержание не подводится дополнительная энергия.

Одной из основных характеристик резонансных колебательных систем с затуханием, таких как открытый резонатор, является добротность:

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W_T},$$

где W – запасенная энергия колебаний, ΔW_T – энергия, теряемая за период T .

Добротность характеризует способность системы сохранять запасенную энергию. Допустим, что плотность энергии волны равна w , скорость ее распространения c , длина резонатора L , а потери за один проход равны α . Тогда скорость уменьшения плотности энергии за счет потерь дается уравнением

$$dw / dt = -\alpha w(c / L).$$

Решая его, мы получим

$$w = w_0 \exp(-t / \tau_0),$$

где $\tau_0 = L / c\alpha$ – время затухания колебаний в резонаторе.

Из приведенных выражений видно, что

$$Q = 2\pi / [1 - \exp(-T / \tau_0)] \approx 2\pi(\tau_0 / T) = \omega\tau_0 = 2\pi L / (\lambda\alpha), \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi\nu$, ν – частота колебаний, λ – длина волны; приближение сделано при $L \gg \lambda\alpha$.

Затухающие колебания вида $E = E_0 \exp(-t/2\tau_0 - i\omega t)$ не являются монохроматическими. С помощью преобразования Фурье нетрудно показать, что спектральная ширина резонанса на полувысоте связана с временем затухания колебаний соотношением:

$$\delta\nu = (2\pi\tau_0)^{-1}.$$

Следовательно, при достаточно малых потерях, т.е. при $\alpha \ll L/\lambda$,

$$Q = \frac{\nu}{\delta\nu}. \quad (2)$$

Интересно отметить, что эта формула для добротности резонатора аналогична выражению для разрешающей способности ИФП, к которому подводится внешнее, пропускаемое через интерферометр излучение. Однако, необходимо иметь в виду, что характер стационарных колебаний в многолучевом интерферометре-резонаторе и характер затухающих колебаний в этой же системе существенно различны. Поэтому прежде, чем воспользоваться указанной аналогией на практике, необходимо сравнить ширину резонанса в формуле (2) с шириной полосы пропускания ИФП.

Разрешающая способность интерферометра

Рассмотрим сначала систему из двух плоских параллельных зеркал очень больших размеров, на которую падает достаточно широкий (слабо расходящийся) пучок лучей, т.е. почти плоская волна. Тогда, пренебрегая дифракционными эффектами, можно легко найти (например, с помощью метода Эйри – метода многократных отражений) интенсивность излучения, попадающего в приемное устройство после прохождения через ИФП

$$I(\phi) = K_0 I_{in} \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2(\phi/2)},$$

где $T_{1,2}$ и $R_{1,2}$ – коэффициенты пропускания и отражения зеркал; $\phi = 2(\omega/c)L \cos \theta$ – разность фаз соседних интерферирующих лучей; θ – угол падения излучения; I_{in} – интенсивность падающей волны; K_0 – доля энергии, попадающей в приемное устройство при отсутствии ИФП.

В случае одинаковых зеркал, т.е. при $T_1 = T_2 = T_0$ и $R_1 = R_2 = R_0$,

$$I(\phi) = \left(1 - \frac{A_0}{1 - R_0}\right)^2 \frac{I_0}{1 + [4R_0 / (1 - R_0)]^2 \sin^2(\phi/2)}. \quad (3)$$

Здесь $A_0 = 1 - R_0 - T_0$; $I_0 = K_0 I_{in}$.

Т.к. $\sin^2(\phi/2)$ меняется от 0 до 1, то интенсивность регистрируемого излучения меняется непрерывно от $I_{\max} = [T_0 / (1 - R_0)]^2 I_0$ до $I_{\min} = [T_0 / (1 + R_0)]^2 I_0$. Если считать, что $T_0 + R_0 = 1$, т.е. потери в зеркалах (поглощение и рассеяние) отсутствуют, то $I_{\max} = I_0$.

Максимумы прозрачности достигаются при совпадении частоты падающего излучения с одной из собственных частот ИФП, то есть при выполнении условия резонанса:

$$2L \cos \theta = q\lambda, \quad (4)$$

где q – целое положительное число (порядок интерференции). Отсюда находим резонансные частоты

$$\nu_q = \frac{c}{2L \cos \theta} q,$$

на которых коэффициент пропускания ИФП максимален и равен

$$\tilde{T}_{\max} = [T_0 / (1 - R_0)]^2.$$

Теперь, полагая, что $2\sqrt{R_0} / (1 - R_0) \gg 1$, нетрудно из (3) определить спектральную ширину полосы пропускания ИФП, то есть интервал частот, на краях которого интенсивность уменьшается в 2 раза по сравнению с I_{\max} :

$$\delta\nu_u = \frac{1 - R_0}{\pi\sqrt{R_0}} \frac{c}{2L \cos \theta} = \frac{\Delta\nu}{N_{эфф}}.$$

Здесь $N_{эфф} = \pi\sqrt{R_0} / (1 - R_0)$ – число эффективно интерферирующих лучей, т.е. число одинаковых по амплитуде лучей, обеспечивающих такую же разрешающую способность, как и бесконечное число лучей с убывающей амплитудой; $\Delta\nu = c / (2L \cos \theta)$ – область дисперсии ИФП, т.е. интервал, внутри которого не происходит переналожения соседних порядков интерференции.

И, наконец, находим разрешающую способность

$$\mathfrak{R} = \frac{\nu}{\delta\nu_u} = qN_{\text{эфф}} = \frac{2L \cos \theta}{\lambda} \frac{\pi\sqrt{R_0}}{1-R_0}.$$

Отсюда следует, что разрешающая способность ИФП повышается с увеличением его длины L , с уменьшением угла падения волны θ и с увеличением коэффициента отражения R_0 . При $\cos \theta \approx 1$ и $\sqrt{R_0} \approx 1$

$$\mathfrak{R} = \frac{2\pi L}{\lambda(1-R_0)}. \quad (5)$$

До сих пор мы рассматривали ИФП, в котором существенны только те потери, которые обусловлены отличием коэффициентов отражения зеркал от единицы. На практике же могут играть существенную роль дифракционные эффекты, возможны также поглощение и рассеяние излучения в среде между зеркалами и т.д. Поэтому удобно ввести для зеркал некий эффективный коэффициент отражения $R_\alpha < R_0$, в котором учтены потери энергии любой природы [13], в том числе потери из-за выхода излучения из резонатора вследствие дифракции. Тогда вместо (5) будем иметь

$$\mathfrak{R} = \frac{\nu}{\delta\nu_u} = \frac{2\pi L}{\lambda\alpha},$$

где $\alpha = 1 - R_\alpha$, причем $\alpha \ll 1$.

Сравнивая это выражение с формулами (1) и (2) для добротности, видим, что в рамках сделанного приближения

$$\delta\nu_u = \delta\nu \text{ и } \mathfrak{R} = Q.$$

Дифракционные потери в открытых резонаторах с плоскими зеркалами

Величину Q , согласно (1), можно поднять путем увеличения L , однако при разведении зеркал вклад дифракционных потерь в α также возрастает.

Вопрос о дифракционных потерях в открытых резонаторах имеет особое значение. Прежде всего, следует отметить, что наличием дифракционных потерь открытые резонаторы отличаются от замкнутых объемных резонаторов. Именно дифракционные потери осуществляют прореживание спектра собственных колебаний при удалении боковых стенок у “закрытого” (объемного) резонатора, обеспечивая низкую

добротность для колебаний, распространяющихся под достаточно большими углами к оси резонатора. Конечно это не единственный источник потерь, а в некоторых случаях даже не главный. Но в случае идеально отражающих зеркал и абсолютно прозрачной межзеркальной среды потери энергии, обусловленные дифракцией на краях зеркал с конечной апертурой, остаются принципиально неустранимыми, а потому принципиально важными.

Рассмотрим резонатор, состоящий из двух плоских одинаковых зеркал радиуса R . Пусть волна с однородным поперечным распределением амплитуды и плоским фронтом стартует от одного из зеркал. Прежде, чем эта волна достигнет второго зеркала, она, очевидно, потеряет часть энергии из-за дифракционного расплывания. Радиус волнового пучка, прошедшего расстояние $L \ll R^2 / \lambda$, увеличится на величину $\Delta R \approx \sqrt{\lambda L} \ll R$ [13]. Поэтому излучение, попадающее в кольцо площадью $2\pi R \Delta R$ вокруг второго зеркала, выйдет из резонатора. Таким образом, доля энергии α_D , теряемая за счет дифракции за один проход (в предположении об однородном распределении амплитуды и фазы поля), равна отношению площади рассмотренного кольца к площади зеркала, т.е.

$$2\pi R \Delta R / \pi R^2 \approx 2\sqrt{\lambda L} / R = 2 / N^{1/2}. \quad (6)$$

Здесь $N = R^2 / \lambda L$ – число Френеля, показывающее, сколько примерно зон Френеля укладывается на одном из зеркал резонатора, если на него смотреть из центра другого зеркала.

Если же распределение амплитуды поля на зеркале отличается от однородного, заметно спадая к краям, то доля энергии, теряемая за счет дифракции, будет меньше, чем в приведенной оценке.

Более строгий подход к оценке дифракционных потерь в открытых резонаторах основан на возможности существования в них устойчивых мод (собственных типов колебаний). Действительно, дифракционное расплывание препятствует возвращению в резонатор полной энергии исходного излучения при каждом акте прохождения излучения между зеркалами и отражения от зеркал. Именно поэтому закономерен вопрос о том, приближается ли распределение поля в резонаторе после многих проходов к стационарному, воспроизводящемуся при каждом дальнейшем проходе состоянию, то есть, иначе говоря, существуют ли в открытом резонаторе устойчивые типы колебаний с малыми потерями.

Ответ был дан в известных работах А. Фокса и Т. Ли [14]. Для вычисления электромагнитного поля у одного из зеркал (в виде интеграла от поля у другого зеркала) использовалось скалярное представление принципа Гюйгенса в форме Кирхгофа-Френеля. (Это допустимо, если

размеры зеркал велики по сравнению с длиной волны, поле близко к поперечному электромагнитному, а поляризация волны не меняется, оставаясь линейной).

Процедура вычислений, выполняемых в [14] методом последовательных приближений, начиналась с предположения о произвольной начальной конфигурации поля и затем повторялась для сотен проходов излучения между зеркалами. Вычисления проводились с помощью ЭВМ. В результате оказалось, что установившаяся полевая конфигурация становится действительно самовоспроизводящейся после конечного числа проходов. Под “самовоспроизведением” имеется в виду ситуация, когда распределения амплитуды и фазы поля после прохождения от одного зеркала до другого и обратно остаются неизменными с точностью до постоянного комплексного множителя, учитывающего общие потери и фазовый сдвиг за проход.

На основе анализа данных, приведенных в [14], дифракционные потери можно представить в виде

$$\alpha_D = A(\lambda L / R^2)^B = A / N^B, \quad (7)$$

где A и B – постоянные, зависящие от геометрии зеркал, N – число Френеля. Для плоских круглых зеркал $A \approx 0,2$, $B \approx 1,4$, $B \approx 1,4$.

С учетом потерь на отражение $\alpha_R = 1 - R_0$ и потерь на дифракцию α_D находим

$$1 / Q = \lambda \alpha_R / (2\pi L) + [\lambda / (2\pi L)] A (\lambda L / R^2)^B.$$

Рассматривая добротность Q как функцию длины L резонатора, получим условия, при которых добротность максимальна

$$\alpha_R = \alpha_D (B - 1), \quad L = (R^2 / \lambda) \{ \alpha_R / [A(B - 1)] \}^{1/B}.$$

Типы колебаний открытого резонатора с плоскими прямоугольными зеркалами

И опыт, и аналитические расчеты [11,13,15] показывают, что в открытых резонаторах с плоскими зеркалами поле собственного типа колебаний (моды) представляет собой стоячую волну с почти плоским волновым фронтом, а зависимость амплитуды поля как от продольной (z), так и от поперечных (x, y) координат хорошо описывается (при больших числах Френеля) произведением гармонических функций, которые спадают практически до нуля на краях зеркал:

$$\sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) \exp(-i\omega t), \quad (8)$$

где

$$k_x \approx (\pi/a)m, \quad k_y \approx (\pi/b)n, \quad k_z = (\pi/L)q. \quad (9)$$

Здесь q , m и n – целые положительные числа, a и b – длины сторон прямоугольных зеркал, а начало координат совмещено с вершиной зеркала.

Машинные расчеты [10] также показали, что для стационарного распределения поля характерно уменьшение амплитуды к краю зеркала. (Кстати, именно поэтому величина дифракционных потерь, рассчитанных по формуле (7), существенно меньше, чем по формуле (6)).

Однако, работа [10] не объясняет – каким образом в открытом резонаторе устанавливаются стоячие волны в направлениях, параллельных краям зеркал.

Механизм образования стоячих волн был раскрыт в [11], где показано, что высокочастотный собственный тип колебаний в открытом резонаторе можно рассматривать как волноводную волну между параллельными плоскостями при частоте, лишь слегка превышающей критическую частоту $\nu_{кр} = cq/(2L)$. Когда такая волна подходит к открытому краю резонатора, дифракция на открытом крае приводит к тому, что излучение почти не выходит наружу и “отражается” назад. При этом фазовый скачок при отражении несколько отличается от π [11], вследствие чего узлы образовавшейся стоячей волны немного не совпадают с краями зеркал (см. (9)).

К выводу о почти полном отражении волноводной волны от края резонатора приводят также следующие соображения. При частоте, близкой к критической, волна является медленной, то есть подходит к открытому краю с низкой групповой скоростью [15]. При этом ее фазовая скорость, как известно, намного больше скорости света в вакууме. Следовательно, плоскость, проходящая через края зеркал параллельно оси резонатора, может рассматриваться как высокоотражающая граница раздела между внешним пространством и средой с очень малым показателем преломления, эквивалентной волноводу [15].

Таким образом, роль дифракционных эффектов оказывается двойственной. С одной стороны, уход энергии из резонатора из-за дифракции приводит к уменьшению его добротности, а с другой – поле удерживается внутри, несмотря на отсутствие боковых стенок, именно благодаря дифракции.

Переписав (8) в форме

$$\sin(k_x x) \sin(k_y y) \left[e^{i(k_z z - \omega t)} - e^{-i(k_z z + \omega t)} \right] / (2i),$$

видим, что стоячая волна состоит из двух когерентных волновых пучков, распространяющихся вдоль оси резонатора в противоположных направлениях и имеющих распределение поля в поперечной плоскости, которое описывается комбинацией слагаемых вида $\exp\left[i(\pm k_x x \pm k_y y)\right]$.

Таким образом, каждый из двух пучков, распространяющихся вдоль оси z , состоит, в свою очередь, из четырех плоских волн. Углы, под которыми распространяются волны в резонаторе, очевидно, могут принимать лишь дискретный ряд значений:

$$\sin \theta_{mn} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} / k.$$

Отсюда, с учетом (9), следует, что

$$2L \cos \theta_{mn} \approx q\lambda. \quad (10)$$

Волны с $m \geq 2$, $n \geq 2$ называются боковыми волнами, в отличие от осевой или аксиальной волны с минимальными значениями $m = n = 1$. (Интересно отметить сходство и различие формул (10) и (4)!).

Обратимся к частотным характеристикам резонатора. Как известно, между модулем волнового вектора и круговой (циклической) частотой существует связь $\omega = kc$. Поэтому для частот стоячих волн получаем:

$$\omega_{mnq}^2 = c^2(k_x^2 + k_y^2) + (\pi c q / L)^2.$$

Опуская поперечные индексы и переходя от круговых к обычным частотам, эту формулу, с учетом (9), можно переписать в виде

$$v_q^2 = v_0^2 + (cq/2L)^2, \quad (11)$$

где $v_0^2 \approx [(m/a)^2 + (n/b)^2](c/2)^2$. Более точно параметр v_0^2 можно вычислить с помощью теории, изложенной в [11]. Он может быть также определен экспериментально.

При внесении достаточно тонкой диэлектрической пластины в резонатор его длина L с "точки зрения" волны изменяется на величину $\Delta L = (n_0 - 1)d^2$, зависящую от показателя преломления n_0 пластины и ее толщины d , что, в свою очередь, приводит к сдвигу собственных (резонансных) частот. На основе (11) нетрудно получить формулу для определения n_0 по результатам соответствующих измерений.

² Если не учитывать многократные отражения в пластине.

И, наконец, рассмотрим оценку дифракционных потерь на основе сравнительно простых соображений, дающую, с точностью до безразмерного коэффициента, правильный результат. (Более строгая теория приведена в [11]).

Для того чтобы дифракционные потери были малыми, уширение пучка должно составлять небольшую часть от поперечных размеров зеркал. Это возможно только при дифракции Френеля. В этом случае пучок, пройдя расстояние L , уширится на величину $\sqrt{\lambda L}$, примерно равную радиусу первой зоны Френеля [13,15].

Тогда, после распространения бегущей волны от первого зеркала на длину L , то есть до второго зеркала, за пределы последнего может проникнуть лишь та часть потока энергии, которая проходит через полосу вдоль периметра исходного волнового фронта с шириной порядка $\sqrt{\lambda L}$ [13].

Так как зависимость потока энергии от поперечных координат, согласно (8), имеет вид

$$\sin^2(\pi mx / a) \sin^2(\pi ny / b),$$

то полный поток энергии, стартующий от первого зеркала, пропорционален величине

$$\int_0^a \sin^2(\pi mx / a) dx \int_0^b \sin^2(\pi ny) dy = ab / 4,$$

а мимо второго зеркала проходит часть этого потока, сосредоточенная в указанной полосе, т.е.

$$2b \int_0^{\sqrt{\lambda L}} \sin^2(\pi mx / a) dx + 2a \int_0^{\sqrt{\lambda L}} \sin^2(\pi ny / b) dy \approx \frac{2\pi^2}{3} \left(\frac{m^2}{a^2} b + \frac{n^2}{b^2} a \right) (\lambda L)^{3/2}$$

(Здесь синусы заменены аргументами.)

Следовательно, для относительных потерь имеем

$$\alpha_D \propto m^2 \left(\sqrt{\lambda L} / a \right)^3 + n^2 \left(\sqrt{\lambda L} / b \right)^3$$

Полученное выражение справедливо, если

$$\left(\pi m \sqrt{\lambda L} \right) / a \ll 1, \quad \left(\pi n \sqrt{\lambda L} \right) / b \ll 1.$$

При $a = b$ (квадратные зеркала)

$$\alpha_D \propto (m^2 + n^2) / N^{3/2},$$

где N - число Френеля.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из источника излучения (1), передающей (2) и приемной (3) рупорных антенн, а также индикатора, состоящего из детекторной секции (4) и измерительного прибора (5).

В качестве источника излучения используется “Генератор качающейся частоты 61” (ГКЧ-61). Излучение от него направляется при помощи рупорной антенны на систему (6) из двух частично прозрачных высокоотражающих зеркал, т.е. резонатор Фабри-Перо (РФП). Зеркалами служат плоские металлические решетки малого (по сравнению с длиной волны) периода. Их размеры $a = b \approx 20$ см. Падающая электромагнитная волна является E – поляризованной для обеих решёток. Часть излучения, прошедшего через РФП, улавливается приемным рупором и регистрируется “Индикатором КСВН и ослабления Я2Р-67”.

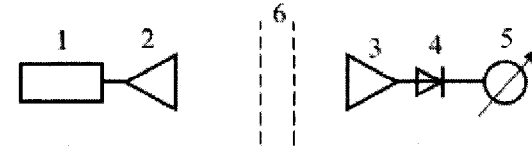


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Следует отметить, что в данной работе предполагается использование безлинзовой системы регистрации интерференционного сигнала. (В этом случае, как показано в [16], коэффициент пропускания РФП с хорошей точностью описывается функцией Эйри как в дальней, так и в ближней зоне).

Вид рупорной антенны показан на рис. 2, а изображение ГКЧ-61 с индикатором Я2Р-67 приведено на рис. 3.

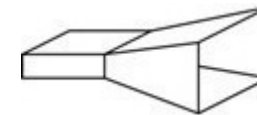


Рис. 2. Рупорная антенна



Рис. 3. ГКЧ-61 с индикатором Я2Р-67

Подготовка к измерениям

а) Изучить лабораторную установку и правила использования измерительной аппаратуры (см. ПРИЛОЖЕНИЕ).

б) Включить приборы и сначала (при удаленном РФП) выбрать полосу частот для измерения $\delta\nu$ и $\Delta\nu$; в этом качестве наиболее подходящим является горизонтальный участок амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), на котором коэффициент передачи сигнала между передающей и приемной антеннами является наибольшим.

в) Вращая ручку “отсчет” совместить отсчётную линию с указанным участком и с помощью ручки “калибровка” установить затухание 0 db на \log - шкале (при этом коэффициент передачи принимается равным 1).

г) В режиме автоматической перестройки частоты и в ручном режиме изучить интерференционную картину, обусловленную переотражениями волны между рупорами (2) и (3). Исследовать влияние расстояния между рупорами на эту («паразитную») интерференцию.

д) Установить РФП на оптическую скамью и отъюстировать его при расстоянии между зеркалами $L_1 \approx \lambda/2$ так, чтобы на резонансной частоте коэффициент пропускания интерферометра-резонатора \tilde{T}_{\max} был близок к 1 .

е) Объяснить отличие АЧХ, получаемой в режиме автоматической перестройки частоты от АЧХ, получаемой в ручном режиме.

Задания

1) Получить спектр интерференционного сигнала при расстоянии между зеркалами РФП $L_1 \approx \lambda/2$ и объяснить его особенности при различных расстояниях между РФП и излучающим рупором.

2) Измерить ширину $\delta\nu$ полосы пропускания на уровне $\tilde{T}_{\max}/2$ (затухание 3 db) при $L_q \approx q\lambda/2$ ($q = 1, 2, 3, \dots, 6$), перемещая одно из зеркал (при неподвижном втором) и фиксируя при этом соответствующие резонансные частоты ν_q . (Ширина резонансной кривой определяется с помощью частотных меток на экране измерителя КСВН и ослабления Р2-67). Определить также величину затухания при резонансной настройке, то есть для тех же частот ν_q ($q = 1, 2, 3, \dots, 6$).

3) Измерить сдвиги резонансных частот при внесении в РФП прозрачной диэлектрической пластины.

4) По результатам измерений в п.2 рассчитать разрешающую способность (добротность) и величину дифракционных потерь.

5) Построить график зависимости добротности резонатора Q от его длины L .

6) Построить в \log - масштабе график зависимости дифракционных потерь от числа Френеля; представив дифракционные потери в виде $\alpha_D = \gamma N^\beta$, определить константы β и γ .

7) По результатам измерений в п.3 вычислить значения параметра V_0^2 , входящего в формулу (11) и определить показатель преломления диэлектрика n_0 . (Толщина диэлектрической пластины d , необходимая для определения n_0 , измеряется микрометром (штангенциркулем) и берется как среднее из четырех измерений).

8) Сравнить внутррезонаторный способ измерений с методом двухлучевой интерферометрии.

9) Оценить погрешности.

Контрольные вопросы

1) Как определить экспериментально количество волновых пучков, эффективно участвующих в интерференции?

2) При каких условиях разрешающая способность интерферометра – резонатора равна его добротности?

3) Можно ли рассматривать зеркало в виде сетки или решетки как сплошное при анализе его отражающих свойств? при анализе дифракции на его краях?

4) С какой точностью должна обеспечиваться параллельность зеркал?

5) Нарисовать диаграмму направленности излучения, выходящего из резонатора, для волн с поперечными индексами поля $m = n = 1$ и, например, $m = n = 4$.

ПРИЛОЖЕНИЕ. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к использованию измерителя КСВ и ослабления Р2-61 [17]

I. Назначение измерителя Р2-61, его технические характеристики и входящие в него узлы

Прибор Р2-61 предназначен для наблюдения на экране электронно-лучевой трубки и измерения частотных характеристик коэффициента стоячей волны (КСВ) и ослабления проходящей мощности в устройствах СВЧ в диапазоне от 8,15 до 12,05 ГГц. Пределы измерения КСВ – от 1,035

до ∞ , пределы измерения ослабления – от 0 до 50 дБ. Измерения КСВ и ослабления могут производиться и на фиксированной частоте.

Структурная схема измерителя Р2-61 для калибровки при измерениях КСВ и ослабления в полосе частот представлена на рис. П.1. Панорамный измеритель состоит из генератора качающейся частоты (1) типа ГКЧ-61, индикатора КСВ и ослабления (2) типа Я2Р-67, коаксиально-волноводного перехода (3), двух направленных ответвителей (НО) 4 («падающая волна») и 5 («отраженная волна») с детекторами и оконечной поглощающей нагрузки (6). В схеме на рис. П. 1 НО (4) и НО (5) включены одинаковым образом и регистрируют одну и ту же волну.

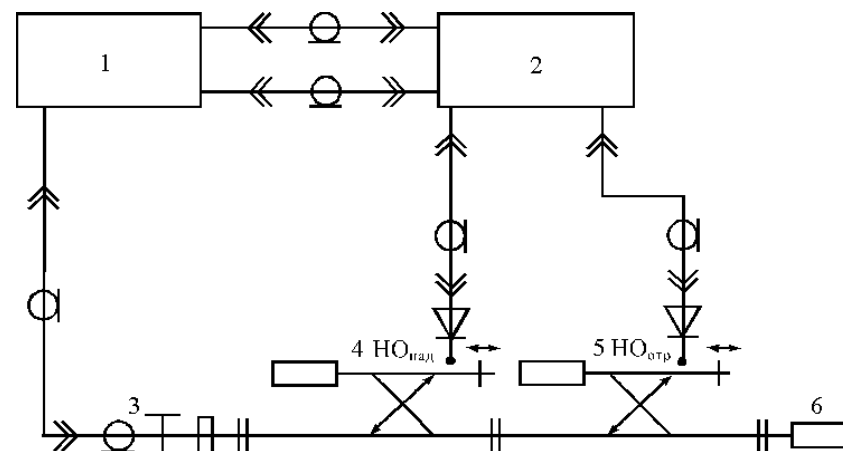


Рис. П.1. Структурная схема генераторного блока измерителя КСВН и ослабления Р2-61.

Работа измерителя основана на принципе раздельного измерения двух бегущих волн, одна из которых падает от генератора, а другая отражена от исследуемого устройства (при измерении КСВ) или прошла через исследуемое устройство (при измерении ослабления).

Основное назначение ГКЧ – генерирование высокочастотного поля с изменяющейся частотой и стабилизированной в диапазоне частот мощностью. Полоса качания частоты от 120 МГц до полного частотного диапазона. ГКЧ может работать и на фиксированной частоте.

Генератор качающейся частоты (ГКЧ) обеспечивает ручную перестройку и автоматическое качание частоты в пределах установленных

границ F1, F2. Главные требования к ГКЧ анализатора цепей СВЧ – широкий диапазон перестройки частоты при минимальной вариации амплитуды, уровень выходной мощности не менее нескольких мВт, отсутствие побочных колебаний и гармоник. Эти требования противоречивы и ограничивают диапазон перестройки частоты ГКЧ до 40 – 60% на частотах порядка 10 ГГц и выше. ГКЧ управляется по частоте пилообразным напряжением развёртки, по амплитуде – системой автоматической регулировки мощности (АРМ).

Обычно генератор качающейся частоты совместно с элементами измерительного тракта (переходами, аттенуаторами, блоком питания и пр.) выполняют в виде отдельного блока.

В качестве автогенератора ГКЧ использован диод Ганна, включенный в ферродиеlectricкий резонатор (ЖИГ-сфера). Управление резонансной частотой ЖИГ-сферы производится изменением напряженности подмагничивающего поля, создаваемого пилообразным управляющим напряжением $U_{упр}$. Регулировка уровня выходного сигнала и стабилизация его амплитуды проводится системой автоматической регулировки мощности (АРМ). Сигнал ошибки для АРМ вырабатывается путем сравнения протектированного сигнала падающей волны $U_{пад}$ и опорного напряжения $U_{оп}$. Регулирующим элементом АРМ является электрически управляемый полупроводниковый аттенуатор, устанавливаемый на выходе генераторного блока.

Контроль работы системы АРМ проводят, подавая на индикатор сигнал падающей волны. В случае правильной работы АРМ на экране индикатора должна получаться горизонтальная линия. Однако надо помнить, что система АРМ получает информацию об амплитуде генерируемого сигнала с НО падающей волны. Поэтому при неравномерности АЧХ этого ответвителя появится частотная зависимость амплитуды выходного сигнала. Она будет соответствовать инвертированному виду АЧХ НО падающей волны – там, где переходное ослабление НО уменьшается, система АРМ увеличит амплитуду – и наоборот. Вид этой зависимости называют собственной АЧХ прибора. Для компенсации её неравномерности используют измерители отношений протектированных сигналов падающей и отраженной волн, а также стремятся использовать направленные ответвители с одинаковыми параметрами. Регулировкой опорного напряжения АРМ можно управлять средней мощностью генератора. Уровень мощности сигнала ГКЧ обычно регулируют выходным аттенуатором, который выполняет также функции устройства развязки. Для работы низкочастотного индикаторного блока (усилителей и измерителей отношений) используют амплитудную

модуляцию (манипуляцию) СВЧ сигнала. При этом проще усиливать выходные измерительные сигналы и фильтровать их от помех. Частоту модуляции выбирают порядка десятков кГц, форму сигнала модуляции – прямоугольные импульсы (меандр). Модуляцию выполняют с помощью полупроводникового коммутатора, установленного в тракт выходного сигнала генератора.

Индикатор Я2Р-67 позволяет наблюдать на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) частотные характеристики КСВ и ослабления и производить отсчет измеряемых величин по шкалам отсчётного устройства.

Измерительный блок анализатора КСВН и ослабления имеет общий измерительный канал для сигналов отраженной и проходящей волн (А), которые подают от НО в зависимости от измеряемого параметра. Переключение режимов измерения тогда проводят перекоммутацией измерительного тракта. Дополнительный канал падающей волны (С) служит для контроля равномерности собственной АЧХ генератора и работы системы АРМ. На измерительный блок подают протектированные НЧ сигналы падающей, отраженной или проходящей волн. Эти сигналы поступают на узкополосные усилители и далее - на синхронные детекторы (СД). Последние позволяют получить постоянные напряжения, пропорциональные квадратам амплитуд (мощности) падающей $U_{пад} \sim R_{пад}$ и отраженной/проходящей волн ($U_{отр}$, $U_{пр}$).

Синхронный детектор – это преобразователь частоты, в котором частота сигнала равна частоте гетеродина, а на выходе с помощью узкополосного ФНЧ выделяют сигнал разностной частоты – постоянное напряжение. Преимущество синхронных детекторов – их хорошие фильтрующие свойства и помехозащищенность. В качестве сигнала гетеродина СД используют усиленный сигнал падающей волны. Недостаток синхронных детекторов – зависимость выходного сигнала от фазового сдвига входных НЧ напряжений – в данном случае не сказывается.

Выделенные напряжения сигнала подают на измеритель отношения и - далее - на канал Y осциллографического индикатора. На канал X подают сигнал от генератора пилообразного напряжения, который обычно размещают также в индикаторном блоке. Длительность прямого хода пилообразного напряжения определяет время анализа частотной характеристики. В приборе используют стандартные значения 0,08с, 1 и 10 с. Выбор большего времени анализа осуществляют с целью исключения

динамических погрешностей при исследовании узкополосных СВЧ устройств.

Предусматривают режим работы от внешнего управляющего напряжения, а также режим ручной перестройки частоты. Последний превращает измеритель в одночастотный генератор со стабильной амплитудой и ручной перестройкой в диапазоне частот. Это дает возможность проводить особо точные измерения на фиксированных частотах с использованием внешних вольтметров и частотомеров.

Для показа частотных зависимостей в панорамных аналоговых приборах используют осциллографический индикатор. Фактически это упрощенный осциллограф, в котором предусмотрены два канала (X – горизонтального отклонения и Y – вертикального отклонения) и электронно-лучевая трубка с увеличенным послесвечением. На канал X подают напряжение развертки, на канал Y – выходной сигнал с измерителя отношения, пропорциональный квадрату модуля коэффициента матрицы рассеяния. На канал Y также поступают сигналы частотных меток с блока управления ГКЧ. При этом на осциллограмме создаются их изображения в виде коротких импульсов. Частота ГКЧ каждой метки индицируется на цифровом табло (M1 или M2). Совмещая метку с интересующей точкой исследуемой характеристики, по табло отсчитывают ее частоту. Вертикальная шкала осциллографического индикатора имеет размерность квадрата модуля коэффициента отражения / передачи. Это справедливо при нормировке амплитуды падающей волны к единице.

Перед измерениями прибор калибруют по двум уровням. Первая калибровка – по нулевому уровню сигнала – обычно делается при настройке прибора. Совмещают осциллограмму в отсутствие измерительного сигнала (например, при установке согласованной нагрузки) с нулевой линией шкалы индикатора Калибровка единичного уровня коэффициента отражения делается с короткозамыкателем. При этом совмещают кривую отраженной волны с линией единичного коэффициента отражения вертикальной шкалы индикатора (отметка КСВН = ∞). Для проходимых измерений калибровку делают по единичному коэффициенту передачи. Для этого соединяют НО падающей и проходящей волн напрямую и совмещают кривую проходящей волны с линией единичного коэффициента передачи (отметка A = 0 дБ). В англоязычной литературе такой вид калибровки обозначают аббревиатурой SLT – (Short – короткозамыкатель, Load – согласованная нагрузка, Through – прямое соединение). Вертикальная шкала измерителя после калибровки соответствует значениям $|S_{11}|^2$ или $|S_{21}|^2$. Чтобы не пересчитывать вручную эти величины в рабочие параметры – КСВН и



ослабление – используют электронный визир. В индикаторе предусматривают дополнительные шкалы КСВН и ослабления (в дБ), связанные с управляемым вручную указателем – горизонтальной линией на экране (линией электронного визира). Совмещая его с выбранными точками частотной характеристики, по шкалам отсчитываем результат измерения КСВН и ослабления.

II. Назначение органов управления панорамного измерителя P2-61

1. Органы управления ГКЧ:

тумблер СВЧ – включает и выключает СВЧ мощность на выходе ГКЧ;
 ручка УРОВЕНЬ – устанавливает уровень СВЧ мощности на выходе ГКЧ;
 переключатель РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ устанавливает режим работы ГКЧ: F_1F_2 , F_0 , ΔF или ВНЕШ.;
 переключатель АМ устанавливает режим амплитудной модуляции: ВНЕШ., НГ (непрерывная генерация) или ВНУТР.;
 переключатель ВНЕШН. устанавливает систему автоматической регулировки мощности в режим НГ или АМ;
 ручка F_1, F_0 служит для установки начальной частоты полосы качания генератора в режиме F_1F_2 , для перестройки частоты в режиме F_0 и центральной частоты в режиме ΔF ;
 ручки M_1 и M_2 служат для установки отсчетных меток на заданную частоту;
 ручки M_1 и M_2 АМПЛИТУДА регулируют амплитуду частотных меток;
 кнопочный переключатель ВР.ПЕРЕСТРОЙКИ S служит для установки периода автоматического качания частоты, разового запуска развертки 40 с при нажатии кнопки ПУСК, включения режима ручного качания частоты при нажатии кнопки РУЧ.;
 переключатель индикации (справа от светового табло частот) с кнопками F_0F_1 , M_1 , M_2 , $F_2\Delta F$ служит для включения цифровой индикации частоты;
 ручка $F_2, \Delta F$ устанавливает конечную частоту в режиме F_1F_2 .

2. Органы управления индикатора:

ручка МЕТКА – для регулировки амплитуды частотных меток;
 ручка КАЛИБР. – для калибровки индикатора;
 кнопка ЛОГ. – для включения логарифмического режима работы;
 кнопка КОРРЕК. – для включения корректора;
 кнопка  – для включения широкой полосы;
 кнопка  – для включения узкой полосы;

кнопка – 10 dB – для уменьшения чувствительности канала падающей волны на 10 дБ;
ручка ОТСЧЕТ – для перемещения линии электронного визира и отсчета измеряемой величины по шкале индикатора;
переключатель ПРЕДЕЛЫ – для переключения пределов измерения;
ручка ПАД. – для регулировки уровня падающей мощности.

III. Подготовка измерителя к работе


При подготовке к работе панорамного измерителя Р2-61 необходимо установить исходные положения его органов управления.

1. Исходные положения органов управления генератора:

тумблер СЕТЬ – верхнее (ВКЛ.);
тумблер СВЧ – нижнее (ВЫКЛ.);
переключатель АМ – ВНУТР.;
переключатель ВР.ПЕРЕСТРОЙКИ S – 0,08;
переключатель РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ – любое;
переключатель ВНЕШН. – АМ;
ручка F_1, F_0 – крайнее левое;
ручка $F_2, \Delta F$ – крайнее правое;
ручки M_1, M_2 – среднее;
ручка УРОВЕНЬ – крайнее левое;
переключатель индикации – любое;
ручки АМПЛИТУДА M_1 и M_2 – крайнее правое.

2. Исходные положения органов управления индикатора:

тумблер СЕТЬ – верхнее (ВКЛ.);
переключатель ПРЕДЕЛЫ – ПАД.;
ручка МЕТКА – крайнее правое;
ручки КАЛИБР. ПАД. – крайнее левое;
ручка ОТСЧЕТ – любое;

кнопка  – нажата;
кнопки КОРРЕК., ЛОГ., – 10 dB – отжаты.

IV. Калибровка измерителя в полосе частот

Для получения достоверных результатов измерений предварительно следует провести калибровку.

1. ГКЧ, индикатор и СВЧ узлы соединить согласно структурной схеме калибровки, изображенной на рис. П.1.
2. На ГКЧ нажать кнопку F_1F_2 переключателя РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ.
3. Нажать кнопку F_0F_1 переключателя индикации ГКЧ и ручкой F_1, F_0 установить по светящемуся табло ГКЧ нижнюю частоту рабочего диапазона.
4. Нажать кнопку $F_2\Delta F$ переключателя индикации и ручкой $F_2, \Delta F$ установить по табло ГКЧ верхнюю частоту рабочего диапазона.
5. Установить уровень мощности на ГКЧ:
 - а) тумблер СВЧ — в верхнее положение (включено);
 - б) на индикаторе ручкой ОТСЧЕТ установить визир по нижней шкале mV на 2 мВ;

при этом на экране ЭЛТ наблюдаются три линии (см. рис. П.2а): линия электронного визира 1, положение которой регулируется ручкой ОТСЧЕТ; линия падающей мощности 2, регулируемая ручками ПАД. (на индикаторе) и УРОВЕНЬ (на ГКЧ); линия контрольного уровня 3;

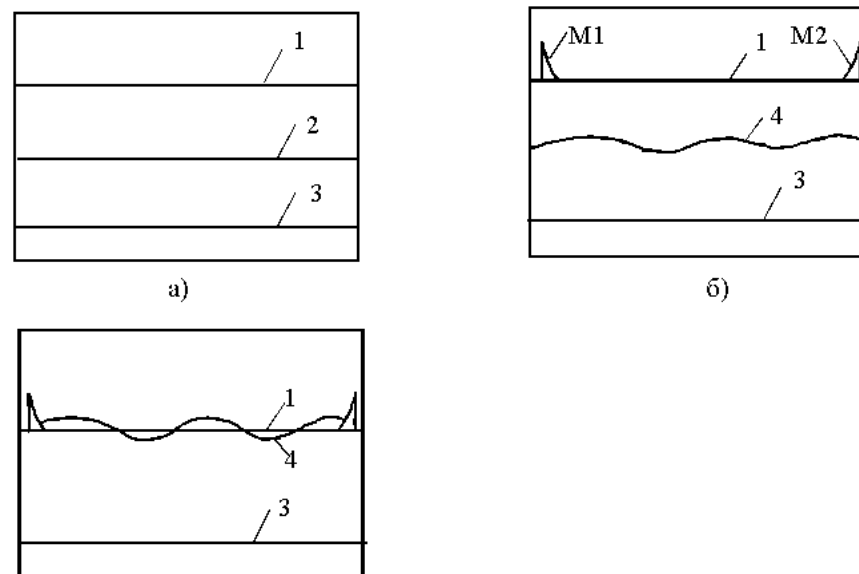


Рис. П.2. 1 – линия электронного визира, 2 - линия падающей мощности, 3 - линия контрольного уровня, 4 - линия калибровки.

- в) ручками УРОВЕНЬ (на ГКЧ) и ПАД. (на индикаторе) совместить на экране ЭЛТ линию падающей мощности 2 с линией электронного визира 1.

6. Ручками M_1 и M_2 совместить на экране метки с началом и концом линии электронного визира (рис. П.2б). Поворачивая поочередно ручки МЕТКА (на индикаторе) и АМПЛИТУДА M_1 или M_2 (на ГКЧ), установить удобную для работы величину частотных меток (3–5 мм).

7. По индикатору провести калибровку прибора в полосе частот:

а) установить ручкой ОТСЧЕТ визир на отметку «0» по верхней шкале dB индикатора;

б) установить переключатель ПРЕДЕЛЫ в положение «0»; при этом на экране ЭЛТ вместо линии падающей мощности наблюдается линия калибровки (рис. П.2б, кривая 4);

в) совместить ручкой КАЛИБР. наблюдаемую на экране линию калибровки 4 с линией электронного визира 1 (рис. П.2в);

г) прибор откалиброван; тумблер СВЧ (на ГКЧ) отключить.

V. Методика измерений КСВ и ослабления в полосе частот

1. Перед измерениями необходимо подготовить к работе и откалибровать измеритель Р2-61 в требуемой полосе частот по методике, изложенной в разд. III и IV.

2. Собрать схему измерений.

а) Для измерения частотной характеристики (ЧХ) КСВ следует собрать схему, изображенную на рис. П.3, в которой к выходному плечу НО 5 подключено входное плечо исследуемого узла СВЧ 6. Ко всем свободным плечам узла СВЧ должны быть присоединены поглощающие оконечные нагрузки. В этой схеме НО 4 и НО 5 включены навстречу друг другу, причем НО 4 регистрирует падающую волну во входном плече узла 6, а НО 5 — отраженную волну в этом же плече.

б) Для измерения частотной характеристики ослабления проходящей мощности используется схема, изображенная на рис. П.4, в которой между НО 4 и НО 5 включен через соответствующие плечи исследуемый узел СВЧ 6. Ко всем свободным плечам узла СВЧ и к выходному плечу НО 5 присоединены поглощающие оконечные нагрузки 7. В этой схеме НО 4 и НО 5 включены одинаковым образом, причем НО 4 регистрирует падающую волну во входном плече узла 6, а НО 5 — прошедшую через узел волну в исследуемом плече.

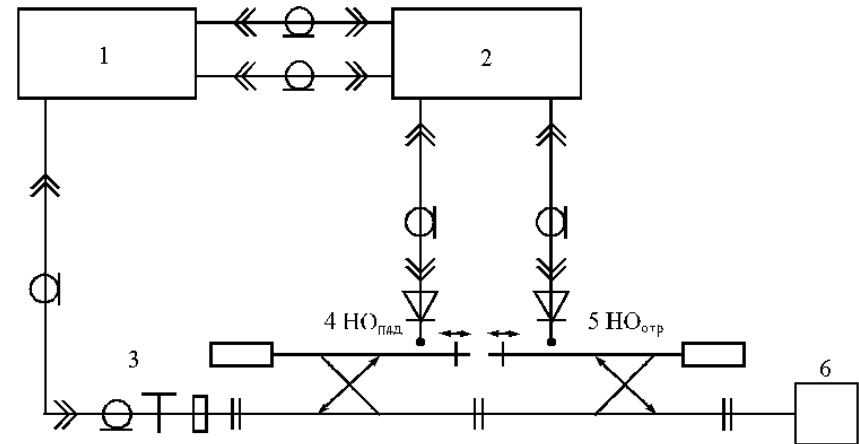


Рис. П.3

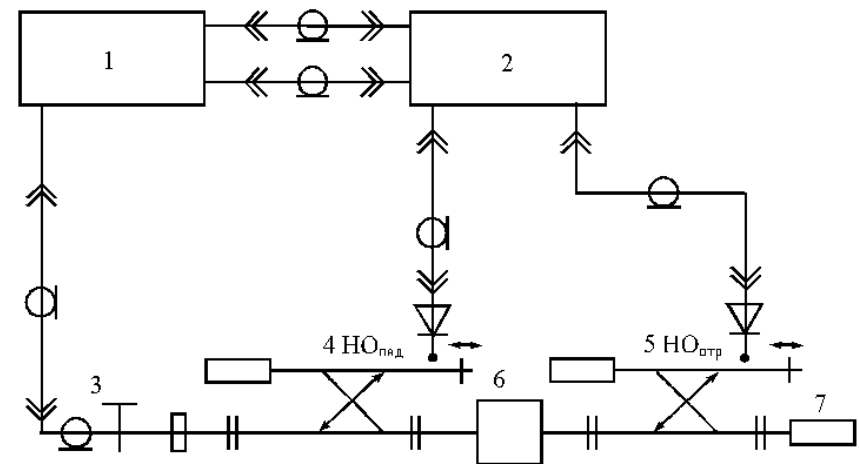


Рис. П.4

ПРИМЕЧАНИЕ. Отметим, что бегущие к узлу волны в плечах называют падающими и обозначают их индексом «+». Соответственно бегущие от узла волны называют отраженными (несмотря на то, что они могут быть обусловлены не только отражением от узла, но и прохождением сквозь узел из одного плеча в другое) и обозначают индексом «-». Например, средние за период мощности падающей и отраженной волн в плече k имеют соответственно обозначения P_{k+} и P_{k-} .

Ослаблением мощности между плечами i и k узла b_{ki} называют выраженное в децибелах отношение средних за период мощностей падающей волны в плече i и прошедшей из этого плеча сквозь узел отраженной волны в плече k : $b_{ki} = 10\lg(P_{i+} / P_{k-})$ (Рис. П.1).

Чтобы мощность P_{k-} была обусловлена только одной падающей волной, ко всем остальным плечам узла, кроме плеча i должны быть присоединены поглощающие оконечные нагрузки. При измерении ослабления b_{ki} прибор Р2-61 определяет величину $10\lg(P_{i+} / P_{k-})$, которая отличается знаком от ослабления (Рис.П.1) мощности, проходящей из плеча i в плечо k .

3. Поставить на ГКЧ тумблер СВЧ в верхнее положение (ВКЛ.).
4. На экране ЭЛТ наблюдаются три линии: нижняя неподвижная прямая — это линия контрольного уровня, кроме нее имеется линия электронного визира (с метками) и третья линия — это линия ЧХ КСВ или ослабления.
5. Переключатель ПРЕДЕЛЫ установить в такое положение, при котором линия ЧХ располагается вблизи середины экрана ЭЛТ.
6. Для определения значения измеряемой величины (КСВ или ослабления) в любой точке ЧХ следует вращением ручки ОТСЧЕТ совместить линию электронного визира (с метками) с выбранной точкой на линии ЧХ. Численные значения КСВ при этом считываются против визира по нижней шкале «КСВ» шкального устройства индикатора. Численные значения ослабления определяются как алгебраическая сумма (с учетом знаков) величины ослабления, соответствующей положению переключателя ПРЕДЕЛЫ (со знаком «минус»), и величины ослабления, отсчитываемой по верхней шкале «дВ» шкального устройства индикатора. Если ослабление превышает 40 дБ, то для расширения диапазона измерений следует нажать на индикаторе кнопку «-10дВ». При этом значение ослабления определяется алгебраической суммой всех трех показаний.
7. Определить значение частоты в любой выбранной точке ЧХ можно по светящемуся табло на ГКЧ, если нажать кнопку M_1 (или M_2) и с помощью ручки M_1 (или M_2) совместить соответствующую метку с выбранной точкой на линии ЧХ.

Таким образом, можно составить таблицу зависимости измеренной величины КСВ или ослабления от частоты в заданной частотной полосе.

VI. Методика измерения КСВ и ослабления проходящей мощности на фиксированной частоте

1. Включить ГКЧ для работы на фиксированной частоте:
 - а) на ГКЧ нажать кнопку F_0 переключателя РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ;

б) ручкой F_1, F_0 установить по световому табло ГКЧ требуемое значение частоты;

в) поставить тумблер СВЧ в верхнее положение (ВКЛ.).

2. Подготовить к работе и откалибровать измеритель на фиксированной частоте f_0 по методике, изложенной в разд. III и IV.

ПРИМЕЧАНИЕ. Если прибор был ранее откалиброван в диапазоне частот, то при переходе к измерениям на фиксированной частоте, лежащей внутри этого диапазона, калибровку прибора производить не нужно.

3. Измерение КСВ и ослабления проходящей мощности на фиксированной частоте производится по схемам и методике, приведенным в разд. V.

Список литературы

- [1] <http://www.phys.nsu.ru/electricity/Labwork6-11.html>
- [2] Виноградов Е. А., Дианов Е. М., Ирисова Н. А. Интерферометр Фабри-Перо короткого миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с металлическими сетками, имеющими период, меньший длины волны. //Письма в ЖЭТФ. 1965, т. 2, вып. 7, с. 323 – 326.
- [3] Захаров М. И., Троицкий Ю. В. Расчёт оптического резонатора с тонкослойным анизотропным модовым селектором. – Радиотехника и электроника, 1973, т. 18, № 2, с. 394 – 398.
- [4] Аржанников А.В., Кузнецов С.А., Синицкий С.Л. Спектральные свойства интерференционных СВЧ фильтров на основе скрещенных решеток-поляризаторов. //Журнал технической физики. 2002, т. 72, вып. 9, с. 102 – 107.
- [5] И.В. Скоков. Расчет спектральных интерференционных приборов. М., "Машиностроение", 1983 г.
- [6] Ю.Н. Дубнищев, Б.С. Ринкевичус. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М., 1983 г.
- [7] В.К. Животов, М.Ф. Крогов. Голография с помощью интерферометра Фабри-Перо. //Доклады АН СССР, 1975, т.224, №5, с.1053 - 1055.
- [8] Н.В. Карлов. Лекции по квантовой электронике. М., Наука, физ.-мат., 1983 г.
- [9] А.С. Завьялов, Г.Е. Дунаевский. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах. Изд-во Томского ун-та, 1985 г.
- [10] А.В. Белинский, А.С. Чиркин. Дифракционная теория многолучевого интерферометра. //Вестник Моск. ун-та. Сер. 3 - Физика. Астрономия, 1986, т.27, №4, с.53 - 58.
- [11] Л.А. Вайнштейн. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М., "Советское радио", 1966 г.
- [12] Ю.А. Ананьев. Оптические резонаторы и проблемы расходимости лазерного излучения. М., Наука, физ.-мат., 1983 г.

- [13] Г.С. Ландсберг. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
- [14] Сб. статей “Лазеры”. М. Издательство иностр. литературы, 1963, с. 325 - 362.
- [15] И.Н. Мешков, Б.В. Чириков. Электромагнитное поле, ч.2. Наука, Сибирское отделение, 1987 г.
- [16] Ю.А. Завенягин, Ю.П. Донцов. Учет дифракционной расходимости лазерного пучка в многолучевой интерферометрии. //Ж-л прикл. спектроскопии, 1971, т.XIV, вып. 3, с. 397-401.
- [17] <http://kepstr.eltech.ru/tor/mt/P2-61.pdf>;
<http://dvo.sut.ru/libr/tedia/w128emp2/7.htm>.

Содержание

Введение	3
Добротность резонатора	5
Разрешающая способность интерферометра	6
Дифракционные потери в открытых резонаторах с плоскими зеркалами	8
Типы колебаний открытого резонатора с плоскими прямоугольными зеркалами	10
Описание экспериментальной установки	14
Подготовка к измерениям	15
Задания	15
Контрольные вопросы	16
ПРИЛОЖЕНИЕ. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к использованию измерителя КСВ и ослабления P2-61	16
Список литературы	27