

Цель работы: знакомство с методами получения и анализа электромагнитных волн СВЧ-диапазона.

В работе используются: генератор СВЧ типа Г4-83, измерительная линия Р1-28, усилитель 28 ИМ, заглушка, отрезок волновода с поглощающей нагрузкой, отрезки волноводов различных сечений, детекторная головка.

Передача энергии электромагнитных (э.м.) колебаний низкой частоты (скажем, 50 Гц) не представляет проблем и делается широко известным способом — по проводам. На более высоких частотах (до 300 МГц) эта задача решается с помощью двухпроводных линий и коаксиальных кабелей. На ещё более высоких частотах (до 300 ГГц), при колебаниях с длинами волн (в вакууме) от 1 метра до 1 миллиметра (этот диапазон называется *диапазоном сверхвысоких частот* или, сокращённо, СВЧ), передача энергии с помощью двухпроводной линии или коаксиальных кабелей становится малоэффективной из-за больших потерь: во-первых, резко возрастает сопротивление проводов из-за *скин-эффекта* — вытеснения тока на поверхность (skin-кожа), а в двухпроводной линии, кроме того, потери растут вследствие излучения энергии в окружающее пространство ($\sim \nu^4$).

В СВЧ-диапазоне энергия передаётся с помощью металлических труб, называемых волноводами (в миллиметровом диапазоне длин волн волноводы могут быть сделаны и из диэлектрика). Электромагнитные волны могут распространяться по металлическим трубам любого профиля, но из технологических соображений сечения волноводов делаются либо круглыми, либо прямоугольными.

Чтобы найти структуру э.м. поля в волноводе, надо решить уравнения Максвелла с соответствующими граничными условиями. Решение этой задачи приведено во многих учебниках, например, в [2]. Мы построим э.м. поле в волноводе, складывая падающую и отражённые от стенок плоские волны. Такой метод называется *концепцией Бриллюэна*.

Рассмотрим отражение плоской э.м. волны от идеально проводящей, бесконечно протяженной плоской поверхности $x = 0$ (рис. 1). Пусть вектор напряжённости электрического поля падающей волны \mathbf{E} параллелен этой плоскости. В наших обозначениях вектор $\mathbf{E}_{\text{пад}}$ направлен по оси Y (на нас). Фронт волны, падающей под углом θ к нормали, показан на рис. 1 пунктиром. Оба вектора напряжённости \mathbf{E} и \mathbf{H} лежат в плоскости фронта волны, им перпендикулярен волновой вектор \mathbf{k} , описывающий распространение волны.

Абсолютное значение волнового вектора \mathbf{k} — волновое число — равно

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega, \quad (1)$$

где λ — длина волны, ω — круговая частота, $v_{\text{ф}}$ — фазовая скорость волны, которая в пустом пространстве совпадает со скоростью света.

Рассмотрим некоторую произвольную точку M на рис. 1. В неё приходят две волны: падающая — $\mathbf{E}_{\text{пад}}$ и отражённая от плоскости — $\mathbf{E}_{\text{отр}}$. Будем отсчитывать расстояния от начала координат (от точки 0), а время t — от момента прихода фронта падающей волны в точку 0. Тогда

$$E_{\text{пад}} = E_0 \cdot e^{i(\omega t - \mathbf{k}_1 \mathbf{r})}, \quad (2)$$

$$E_{\text{отр}} = -E_0 \cdot e^{i(\omega t - \mathbf{k}_2 \mathbf{r})}, \quad (3)$$

где $k_1 = k_2 = \omega/c$. Проекции волновых векторов на оси координат:

$$\left. \begin{aligned} k_{1x} &= -k \cos \theta, & k_{1z} &= k \sin \theta, \\ k_{2x} &= k \cos \theta, & k_{2z} &= k \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Знак минус в отражённой волне связан со сдвигом фаз на 180° , возникающим при отражении волны от проводящей плоскости. Суммарное электрическое поле в точке M имеет вид

$$E = E_0 [e^{i(\omega t - \mathbf{k}_1 \mathbf{r})} - e^{i(\omega t - \mathbf{k}_2 \mathbf{r})}]. \quad (5)$$

Подставляя в (5) координаты вектора $\mathbf{r}(x, 0, z)$ и значения соответствующих проекций векторов \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 из (4), найдём

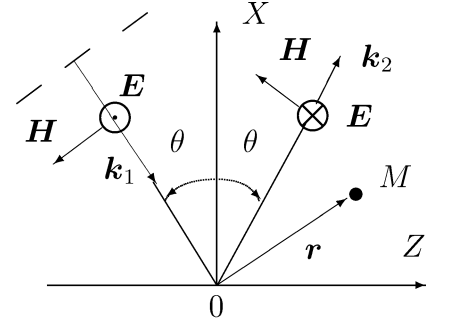


Рис. 1. Отражение плоской волны от проводящей плоскости

$$E = 2iE_0 \sin(kx \cos \theta) e^{i\omega(t - z \sin \theta/c)}. \quad (6)$$

Это выражение описывает волну с амплитудой

$$2iE_0 \sin(kx \cos \theta), \quad (7)$$

бегущую в направлении z с фазовой скоростью

$$v_{\text{ф}} = \frac{c}{\sin \theta}. \quad (8)$$

Отметим две важные особенности этой волны: 1) её фазовая скорость больше скорости света; 2) при фиксированном угле θ амплитуда поля гармонически зависит от x и не меняется со временем. Иначе говоря, в результате интерференции падающей и отражённой волн в пространстве над проводящей поверхностью в направлении оси X образуется система стоячих волн. Электрическое поле стоячей волны равно нулю в точках, где $kx \cos \theta = n\pi$, т.е. там, где

$$x = \frac{n\pi}{k \cos \theta}; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Таким образом, поверхность нулевого электрического поля представляет собой плоскость, параллельную отражающей поверхности. Расположим в этой плоскости вторую проводящую поверхность. Эта поверхность не исказит полученного распределения поля, т.к. на ней автоматически удовлетворяются граничные условия $E(t) = 0$. Точно такие же плоскости можно поставить, например, при $y = 0$ и $y = b$. Эти плоскости нормальны электрическим силовым линиям, и на них выполняются граничные условия.

Итак, мы показали, что в волноводе прямоугольного сечения может распространяться э.м. волна, которую в пределах волновода можно рассматривать как результат суперпозиции двух плоских волн. Каждая плоская волна является чисто поперечной, так что электрическое и магнитное поля перпендикулярны к направлению их распространения. В суммарной волне электрическое поле имеет только составляющую E_y и, следовательно, перпендикулярно оси волновода, а магнитное поле имеет составляющие H_x и H_z .

Электромагнитное поле в волноводе не является чисто поперечным, а имеет продольные составляющие.

В рассмотренном случае отлична от нуля продольная составляющая магнитного поля, и поэтому такую волну называют *магнитной (H-волна)*. Мы могли бы взять другую поляризацию исходной падающей волны ($H = H_y$), и тогда возникла бы *электрическая волна* с $E_z \neq 0$ (*E-волна*).

Посмотрим на соотношение (9) с другой стороны. Если даны две параллельные проводящие плоскости, расположенные на расстоянии a друг от друга, то между ними могут распространяться волны, если

$$\cos \theta_n = \frac{n\pi}{ka} = \frac{n\lambda_0}{2a} = \frac{n\pi c}{a\omega}, \quad (10)$$

где λ_0 — длина волны в свободном пространстве.

Как ясно из (10), движение э.м. волны по волноводу возможно, если углы падения подчиняются условию

$$\cos \theta_n = \frac{n\lambda_0}{2a} \leq 1, \quad (11)$$

поэтому для каждого n существует наибольшая критическая длина волны и соответственно наименьшая критическая частота, при которых волна ещё может проходить через волновод. Нижняя критическая частота

$$\omega_{\text{кр}} = \frac{\pi c}{a} \quad (12)$$

и верхняя критическая длина волны

$$\lambda_{\text{кр}} = 2a \quad (13)$$

соответствуют $n = 1$.

С помощью (8), (10) и (12) нетрудно найти выражение для фазовой скорости э.м. волны, распространяющейся в волноводе:

$$v_{\Phi} = \frac{c}{\sin \theta} = \frac{c}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}} = \frac{c}{\sqrt{1 - (\omega_{\text{кр}}/\omega)^2}}. \quad (14)$$

Фазовая скорость (скорость перемещения поверхности постоянной фазы $v_{\Phi} = \omega/k$) в волноводе больше скорости света в пустоте, а групповая (скорость распространения возмущения $u = d\omega/dk$) всегда меньше. Интересно отметить, что фазовая скорость зависит от частоты. В таких случаях говорят, что среда (в данном случае — волновод) обладает дисперсией.

С помощью (1) и (14) можно найти волновое число k_z , описывающее распространение волны вдоль волновода:

$$k_z = \frac{\omega}{v_{\Phi}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{\text{кр}}}{\omega}\right)^2}. \quad (15)$$

Из этого выражения следует, что по мере убывания частоты волновое число k_z уменьшается и, наконец, при $\omega < \omega_{\text{кр}}$ (или, что то же, $\lambda_0 > 2a$) оно становится мнимым. Это означает, что при частотах $\omega < \omega_{\text{кр}} = \pi c/a$ волны вдоль трубы экспоненциально затухают. Поэтому критическую частоту называют граничной частотой волновода.

Преобразуя соотношение (15), можно связать длины волн в волноводе ($\lambda_{\text{в}}$), в открытом пространстве (λ_0) и критическую ($\lambda_{\text{кр}}$):

$$\frac{1}{\lambda_{\text{в}}^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_{\text{кр}}^2}. \quad (16)$$

Ясно, что никакой выделенности оси X нет, и поэтому точно так же может образоваться синусоидальное распределение поля и вдоль оси Y . Поэтому для каждого вида E - и H -волны получается бесчисленное множество решений, каждое из которых имеет свою критическую частоту и длину волны. В случае прямоугольного волновода с поперечными размерами a и b все возможные критические длины волн определяются общей формулой

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2}},$$

где m и n — целые числа. Величина m представляет собой полное число полупериодов изменения той или иной составляющей поля вдоль пути, идущего параллельно широкой стенке волновода (a), а n — то же для узкой стенки (b). Эти же символы употребляются и в обозначениях волн — соответственно E_{mn} или H_{mn} . Обычно для передачи СВЧ-энергии по прямоугольным волноводам используется волна H_{10} . Её критическая длина волны — максимальная среди всех типов

волн в прямоугольном волноводе, и поэтому её называют *основной*. Тем самым, для волновода заданного сечения существует диапазон частот, ограниченный снизу критической частотой волны H_{10} ($\lambda_{\text{кр}} = 2a$), а сверху — критической частотой следующей распространяющейся волны (например, H_{10} с $\lambda_{\text{кр}} = 2b$ или H_{20} с $\lambda_{\text{кр}} = a$). В этом частотном диапазоне СВЧ-энергия переносится только одним типом волн, что существенно облегчает её дальнейшее использование.

Если в волноводе имеется какое-либо препятствие, нерегулярность (в предельном случае он просто закрыт металлической пластиной), то в нём появляется отражённая волна. Падающая и отражённая волны интерферируют и создают в волноводе стоячую волну, похожую на стоячие волны в струне. Запишем прямую волну, движущуюся в положительном направлении оси Z , в виде

$$E_1 = E_0 \exp[i(\omega t - k_z z)],$$

а отражённую — в виде

$$E_2 = \rho E_0 \exp[i(\omega t + k_z z + \varphi)], \quad (17)$$

где ρ — коэффициент отражения по амплитуде, а φ — фаза отражённой волны. Суммарное поле в волноводе имеет вид

$$E(z) = E_1 + E_2 = E_0 e^{-ik_z z} (1 + \rho e^{i(2k_z z + \varphi)}) e^{i\omega t} = A_0 e^{i\omega t}.$$

Из этого выражения видно, что в каждом сечении волновода ($z = \text{const}$) поле зависит от времени по гармоническому закону, а квадрат амплитуды равен

$$A_0^2 = E_0^2 [1 + \rho^2 + 2\rho \cos(2k_z z + \varphi)]. \quad (18)$$

Максимальное (в пучности) и минимальное (в узле) значения поля равны соответственно:

$$E_{\text{max}} = E_0 (1 + \rho), \quad E_{\text{min}} = E_0 (1 - \rho). \quad (19)$$

Из формулы (18) следует, что расстояние l между соседними узлами (или пучностями) составляет

$$l = \frac{\pi}{k_z} = \frac{\lambda_{\text{в}}}{2}. \quad (20)$$

Это даёт удобный способ измерения длины волны $\lambda_{\text{в}}$ в волноводе. Отношение

$$K = \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{min}}} \quad (21)$$

называется *коэффициентом стоячей волны* (к.с.в.). Из (19) следует, что коэффициент отражения от препятствия по амплитуде

$$\rho = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}} = \frac{K - 1}{K + 1}. \quad (22)$$

В случае полного отражения (металлическая заглушка) $\rho = 1$, а если в волновод вставлено вещество, поглощающее СВЧ-излучение (согласованная нагрузка), то $\rho = 0$.

Для определения коэффициента стоячей волны обычно используют измерительную линию — отрезок волновода с продольной щелью длиной в несколько полуволн. В щели располагается зонд — небольшой металлический штырь (антенна), реагирующий на электрическое поле в волноводе. Напряжение высокой частоты, наводимое на зонд, детектируется, усиливается и подаётся на микро-вольтметр. Зонд может перемещаться вдоль линии — это позволяет исследовать распределение электрического поля в волноводе.

А. Волны в волноводе при частоте выше критической

Экспериментальная установка. Схема для исследования структуры волн в волноводе при частоте выше критической представлена на рис. 2. Модулированный сигнал от высокочастотного генератора (цуги с частотой повторения 1 кГц) поступает на вход А измерительной линии, вдоль которой перемещается зонд S . Высокочастотный сигнал с зонда поступает на кристаллический детектор D^1 .

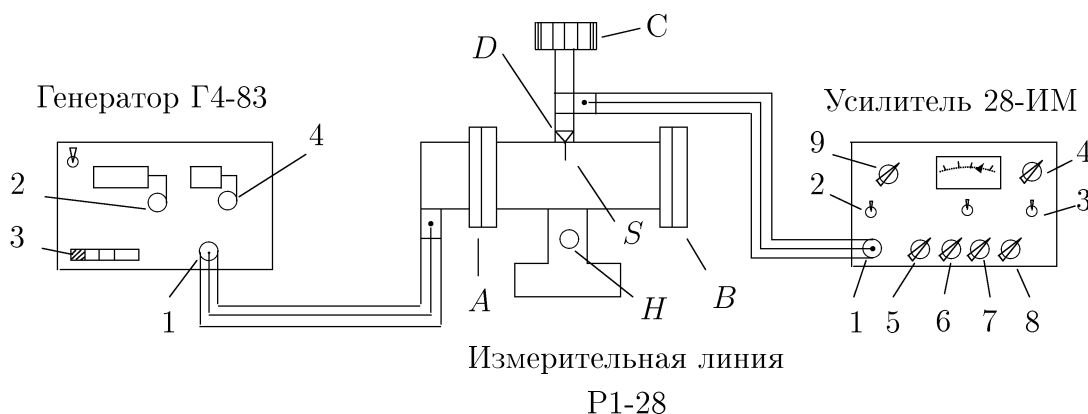


Рис. 2. Схема для исследования структуры волн СВЧ

С нагрузки детектора (с RC -цепочки) снимается огибающая высокочастотного сигнала и подаётся на усилитель низкой частоты. Величина сигнала регистрируется вольтметром, вмонтированным в усилитель. Ручка C — настройка измерительной линии — служит для согласования зонда (как антенны) со входом усилителя. Как правило, они согласованы, и в настройке нет необходимости. В волноводе с закрытым выходом образуется стоячая волна. Определив расстояние

¹ Усилитель 28ИМ позволяет измерять СВЧ-сигнал как с помощью кристаллического детектора, в цепи нагрузки которого под действием СВЧ колебаний появляется постоянный ток, так и с помощью болометра, в котором энергия электромагнитного излучения преобразуется в тепло и измеряется происходящим при этом изменением электрического сопротивления прибора (в качестве болометра может использоваться термистор, баретор, плёночные сопротивления). В нашей работе кристаллический детектор установлен непосредственно в головке измерительной линии, и прибор 28ИМ фактически используется как усилитель переменного напряжения.

между узлами, можно рассчитать длину волны и фазовую скорость СВЧ-сигнала в волноводе. Устройство детекторной головки, установленной на измерительной линии, таково, что отклик вольтметра U на величину напряжённости электрического поля E в волноводе

$$U \sim E^n, \quad (23)$$

а показатель степени n сам зависит от величины сигнала: при малых сигналах детектирование квадратичное ($n = 2$), при больших — линейное ($n = 1$). Если известно распределение поля $E(z)$ вдоль измерительной линии, то, изучив распределение $U(z)$, можно по графику $\ln(U) = f[\ln(E)]$ определить характер детектирования: в двойном логарифмическом масштабе любая степенная функция — прямая линия, по наклону которой можно определить n . Распределение $E(z)$ нетрудно рассчитать для волновода с закороченным концом (металлической заглушкой), когда фаза отражённой волны $\varphi = \pi$, а $\rho = 1$. Как следует из (17), электрическое поле в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} E(z) &= E_0 e^{-ik_z z} (1 - e^{2ik_z z}) e^{i\omega t} = E_0 e^{i\omega t} (e^{-ik_z z} - e^{ik_z z}) = \\ &= 2E_0 e^{i\omega t} \sin(k_z z) \sim \sin(k_z z). \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь z — смещение от узла.

Меняя нагрузку на выходе измерительной линии (В на рис. 2) и сравнивая максимальное и минимальное показания вольтметра, можно рассчитать коэффициент стоячей волны (к.с.в.) и коэффициент отражения ρ .

Б. Волны в волноводе при частоте ниже критической

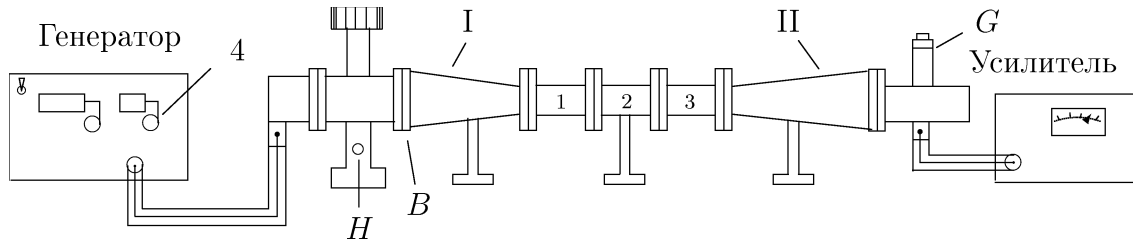


Рис. 3. Схема для исследования затухания

Для исследования затухания волн в волноводе при частоте ниже критической используются те же генератор, усилитель, измерительная линия и дополнительный набор волноводов с отдельной детекторной головкой G (рис. 3). Дополнительный набор начинается и заканчивается волноводами переменного сечения I и II. Между ними можно разместить 1, 2 или 3 одинаковых отрезка с постоянным сечением. В такой системе волны с частотами меньше критической экспоненциально затухают.

Мощность сигнала на выходе из волновода W можно связать с мощностью входного сигнала W_0 двумя способами:

$$W = W_0 e^{-\alpha z} \text{ или } W = W_0 10^{-\beta z} \quad (z — \text{длина волновода}).$$

Коэффициент (αz) измеряется в *неперах* (Нп). 1 непер соответствует отношению интенсивностей, равному основанию натуральных логарифмов. Коэффициент (βz) принято измерять в *децибелах* [дБ]: один бел соответствует уменьшению мощности в 10 раз; децибел — одна десятая бела. Измеренное в децибелах затухание определяется формулой

$$(\beta z) [\text{дБ}] = 10 \lg(W_0/W).$$

Из этого определения вытекает, что

$$\alpha \left[\frac{\text{Нп}}{\text{см}} \right] = 2,3 \cdot \beta \left[\frac{\text{Б}}{\text{см}} \right]. \quad (25)$$

Если при уменьшении количества вставок волновода поддерживать интенсивность выходного сигнала постоянной, то входной сигнал следует ослабить. Степень ослабления γ зависит от длины волновода z ($\gamma = \beta z$) и измеряется по шкале генератора в децибелах. Именно таким образом в эксперименте определяется коэффициент затухания β . Его можно сравнить с коэффициентом α , рассчитанным теоретически. Как следует из (17), в закритическом волноводе при квадратичном детектировании интенсивность сигнала падает по закону $E^2 \sim e^{-\alpha z}$, где α — коэффициент затухания:

$$\alpha = 2ik_z.$$

Подставляя волновое число из (15) и заменяя частоты с помощью (10) и (12), найдём

$$\alpha = 2ik_z = \frac{2\omega}{c} \sqrt{\left(\frac{\omega_{\text{кр}}}{\omega}\right)^2 - 1} = \frac{2\pi}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{2a}{\lambda_0}\right)^2}. \quad (26)$$

Здесь $\lambda_0 = c/\nu = 3,22$ см — длина волны в свободном пространстве, соответствующая рабочей частоте $\nu = 9320$ МГц, $a = 1,6$ см — размер широкой стенки волновода-вставки.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается при частоте выше критической исследовать стоячую волну в измерительной линии (рис. 2): измерив распределение сигнала вдоль волновода, рассчитать фазовую скорость и определить характер детектирования (линейный, квадратичный и т.д.); затем, меняя нагрузку на выходе волновода (заглушка, открытый конец или поглотитель), определить коэффициенты отражения э.м. волны. При частоте ниже критической предлагается определить коэффициент затухания волны в сборном волноводе (рис. 3) и сравнить с теоретическим.

А. Исследование структуры волн при частоте выше критической

Мощность сигнала, снимаемого с генератора Г4-83, невелика, поэтому излучение не представляет опасности для здоровья человека. Тем не менее заглядывать в открытый волновод при включённом генераторе не рекомендуется.

1. Подготовка приборов к работе

1. Соедините коаксиальными кабелями выход 1 генератора со входом А измерительной линии (рис. 2), а детекторную секцию D — со входом 1 усилителя. Закройте выходной фланец В измерительной линии металлической пластиной (заглушкой).

Включите в сеть генератор и усилитель. Настройку усилителя следует начинать после 15-минутного прогрева.

Ручкой 2 генератора установите рабочую частоту выходного сигнала $\nu = 9320$ МГц. Клавиша 3, обозначенная на приборе значком (цуги), должна быть утоплена. Ручкой 4 аттенюатора (ослабителя) установите минимальное ослабление выходной мощности $\gamma = 20$ дБ. Остальные ручки генератора не используются.

Пока прогревается усилитель, рассчитайте критическую частоту и убедитесь, что рабочая частота выше критической ($\nu_{кр} = c/2a$; $a = 23$ мм).

2. Проведите настройку усилителя в следующем порядке:

- а) тумблер 2 — КРИСТАЛЛ-БОЛОМЕТР — поставьте в положение КРИСТАЛЛ; переключатели 5 и 9 — Множители напряжения — в положение 1;

- б) тумблер 3 — Вольтметр — поставьте в положение ВЫКЛ; при этом вольтметр отключается от входа 1 усилителя; ручкой 4 — Установка нуля — приведите стрелку вольтметра к нулю;

- в) поставьте переключатель 5 — Входное напряжение — в положение К (калибровка) и заметьте положение стрелки вольтметра, (постоянное калибровочное напряжение составляет 50-100 делений);

- г) включите тумблер 3 — Вольтметр, при этом вольтметр подключается к выходу усилителя и измеряет калиброванное переменное напряжение частоты 1 кГц, которое вырабатывается собственным генератором усилителя;

- д) с помощью ручек 6 — Диапазон частот — и 7 — Плавная регулировка частоты — добейтесь максимального отклонения стрелки вольтметра; если это максимальное значение отличается от ранее зафиксированного постоянного калибровочного напряжения, то ручкой 8 — УСИЛЕНИЕ приведите его к прежнему значению². На этом калибровка вольтметра закончена. При любом положении переключателя 5 (кроме «К») усилитель готов к измерениям.

3. При отражении сигнала от металлической пластины в волноводе образуется стоячая волна. Убедитесь, что усилитель реагирует на перемещение зонда вдоль измерительной линии: стрелка вольтметра должна колебаться от нулевого отклонения

² Можно установить половину калибровочного значения и при измерениях умножать результат на два.

в узле стоячей волны до максимального значения в пучности. Если вольтметр не откликается на перемещение зонда, возможно, нарушена настройка детекторного блока D. Этот блок требует очень тонкой регулировки, поэтому рекомендуем обратиться к лаборанту. Для полной проверки работоспособности схемы убедитесь, что показания вольтметра уменьшаются при изменении частоты генератора из-за перемещения пучности от положения, в которое установлен зонд.

II. Определение длины волны СВЧ-сигнала в волноводе

4. Восстановите рабочую частоту $\nu = 9320$ МГц; перемещая зонд, настройтесь на пучность стоячей волны. Если при этом показания вольтметра превышают 1 мВ, следует ослабить сигнал, идущий с генератора, с помощью аттенюатора 4 (при напряжениях ≥ 1 мВ меняется характер детектирования).
5. С помощью переключателей 5 и 9 подберите чувствительность вольтметра так, чтобы в максимуме стрелка отклонялась почти на всю шкалу. Используя весь возможный диапазон перемещения зонда вдоль измерительной линии, снимите зависимость показаний вольтметра U от положения зонда z (100 дел винта у выхода измерительной линии соответствуют 1 мм). Менять чувствительность вольтметра в течение этой серии нецелесообразно.
6. Постройте график $U = f(z)$ и определите по нему длину волны $\lambda_{\text{в}}$ в волноводе. Сравните результат с теоретическим расчётом $\lambda_{\text{в}}$ по формуле (16).

Сравните длину волны λ_0 в открытом пространстве с критической $\lambda_{\text{кр}}$ [см. (1) и (13)].

Рассчитайте фазовую скорость $v_{\text{ф}}$ волн в волноводе по формуле (1). Рассчитайте групповую скорость u , используя соотношение $u \cdot v_{\text{ф}} = c^2$.

III. Определение характера детектирования

7. Установите зонд в узел стоячей волны ($U = U_{\text{min}}$); переключателями 5 и 9 подберите чувствительность вольтметра так, чтобы отклонение стрелки было заметным. Перемещая зонд вблизи узла (смещение от узла $z < \pm 2$ мм), оцените диапазон изменения показаний вольтметра U . Характер детектирования остаётся неизменным, если напряжение U не превышает величины $U_0 \simeq 1$ мВ. Если $U \ll 1$ мВ, увеличьте сигнал с генератора, используя аттенюатор 4.
8. Снимите зависимость U от координаты зонда внутри выбранного диапазона. Разумно в каждой точке фиксировать отклонение стрелки и множители K_5 и K_9 , соответствующие переключателям 5 и 9.
9. Постройте график $\ln U = f\{\ln[\sin(k_z z)]\}$, где z — смещение от узла. При малых смещениях от узла ($z \lesssim 2$ мм) синус можно заменить его аргументом и построить график $\ln U = f(\ln z)$. По наклону прямой определите характер детектирования — линейный или квадратичный [см. (23) и (24)].

IV. Определение коэффициентов отражения

10. Снимите металлическую заглушку с фланца измерительной линии. Перемещая зонд, измерьте максимальное и минимальное напряжение в волне ($U_{\text{max}} < 1$ мВ).

11. Наденьте на выходной фланец измерительной линии отрезок волновода с поглощающей нагрузкой и снова измерьте максимальное и минимальное напряжения.
12. Считая детектирование квадратичным, определите коэффициенты отражения r для открытого и закрытого волновода и для волновода с поглощающей нагрузкой [см. (21) и (22)]. Объясните полученные результаты.

Б. Исследование затухания волн при частоте ниже критической

V. Подготовка приборов к работе

13. Соберите схему согласно рис. 3: для этого установите на стойках детекторную головку G и волноводы переменного сечения I и II (фланцами меньшего размера друг к другу); закрепите между ними 3 отрезка волноводов постоянного сечения с размером длинной стороны $a = 16$ мм (следите, чтобы отрезки волноводов плотно соединялись между собой одинаковыми сторонами во фланцах); соедините сборный волновод с выходом B измерительной линии. Высоту измерительной линии можно изменять винтом H .

Отсоедините от входа усилителя кабель, идущий от измерительной линии, и подключите к усилителю детекторную головку G .

14. Измерьте длину каждой секции.
15. Рассчитайте критическую частоту для этого волновода ($\nu_{кр} = c/2a$) и убедитесь, что рабочая частота ($\nu = 9320$ МГц) меньше критической.

VI. Измерение коэффициента затухания

16. Настройте детекторную головку на максимальную чувствительность согласно ТО, расположенному на установке (в этом упражнении ограничение $U < 1$ мВ необязательно). Установите минимальное затухание ($\gamma = 20$ дБ) сигнала с генератора и подберите чувствительность вольтметра так, чтобы стрелка отклонялась почти на всю шкалу; заметьте величины U и γ .
17. Последовательно уменьшая число промежуточных секций от трёх до нуля, каждый раз подбирайте такое ослабление γ сигнала с генератора, при котором показания вольтметра усилителя остаются неизменными.
18. Постройте график в координатах $\gamma = f(z)$, где z — полная длина подключённых секций. По наклону прямой рассчитайте коэффициент затухания $\beta = \Delta\gamma/\Delta z$ (в беллах на см) и сравните с рассчитанным теоретически [см. (25) и (26)].

Контрольные вопросы

1. Используя выражения для фазовой и групповой скоростей ($v_{\phi} = \omega/k$, $u = d\omega/dk$) и формулу (15), покажите, что в волноводе справедливо соотношение: $u \cdot v_{\phi} = c^2$.
2. Как направлен вектор Пойнтинга в волноводе?

8-VII-2013г.

Детекторная головка сборного волновода

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

А. У с т р о й с т в о

- 1 - Винт, зажимающий щуп (не отвинчивать!)
- 2 - Детекторная головка с диодом.
- 3 - Винт, фиксирующий резонаторную полость (закрепляющий детекторную головку).
- 4 - Диод.
- 5 - Винт, изменяющий длину резонатора.
- 6 - Штеккер.

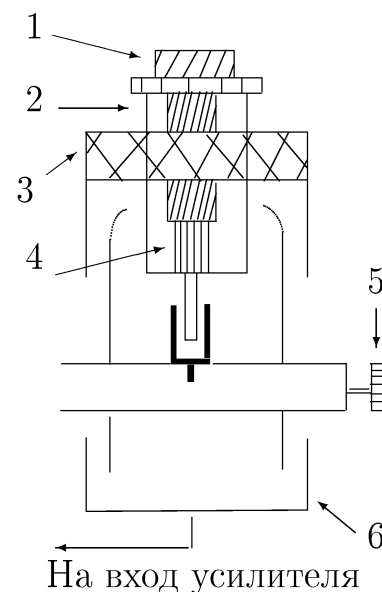


Рис. 4

Б. Н а с т р о й к а

- 1) Соберите волновод и подключите его к усилителю.
- 2) Убедитесь, что штеккер 6 и зажим щупа 1 завёрнуты до упора, (не прилагайте больших усилий, чтобы не разрушить фарфоровую головку диода 4).
- 3) Слегка освободите винт 3, фиксирующий полость. Плавным перемещением головки 2 вверх-вниз (на трении!), настройтесь на максимум выходного сигнала и закрепите фиксирующий винт 3.
- 4) Винтом 5, меняющим длину резонатора, подстройте сигнал на максимум.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. — Т. III. Электричество. — М.: Наука, 1983. § 84.
- 2. *Фейнмановские лекции по физике.* Т. 6. Электродинамика. — М.: Наука, 1966. Гл. 24.
- 3. *Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А.* Основы Физики. Т. I. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. Ч. II, Гл. 8, § 8.4; Ч. III, Гл. 6, § 6.7.

8-VII-2013