

Лабораторная работа 3.7.2
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В
ВОЛНОВОДЕ

Гарина Ольга

22 сентября 2020 г.

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 колебаний низкой частоты (50 Гц) делается по проводам. На более высоких частотах (до 300 МГц) используются двухпроводные линии и коаксиальные кабели. На еще более высоких частотах (до 330 ГГц - 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, а в двухпроводной линии, кроме того, потери растут вследствие излучения энергии в окружающее пространство.

В СПЧ-диапазоне энергия передается с помощью металлических труб, называемых волноводами.

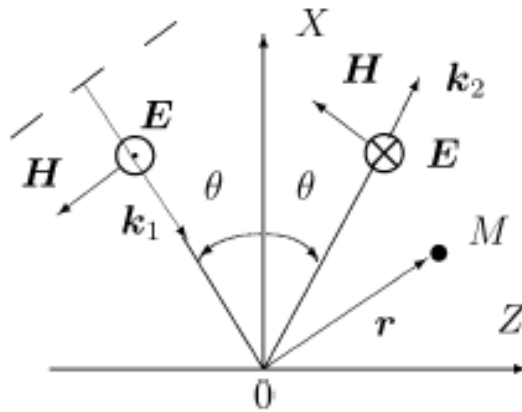


Рисунок 1 – Отражение плоской волны от проводящей плоскости

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

Абсолютное значение волнового вектора \vec{k} – волновое число – равно

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

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

Определение поля волновода (рисунок 1).

$$E_{\text{пад}} = E_0 \cdot \exp(i(\omega t - k_1 r)), \quad (2)$$

$$E_{отр} = -E_0 \cdot \exp(i(\omega t - k_2 r)), \quad (3)$$

В итоге получается

$$E = 2iE_0 \sin(lx \cos \theta) \exp(i\omega(t - z \sin \theta / c)). \quad (4)$$

Это выражение описывает волну с амплитудой

$$2iE_0 \sin(kx \cos \theta), \quad (5)$$

бегущую в направлении z с фазовой скоростью

$$v_\phi = \frac{c}{\sin \theta}. \quad (6)$$

Эта волна имеет 2 важные особенности: 1) ее фазовая скорость больше скорости света; 2) при фиксированном угле θ амплитуда поля гармонически зависит от x и не меняется со временем.

В волноводе прямоугольного сечения может распространяться э.м. волна, которую в пределах волновода можно рассматривать как результат суперпозиции двух плоских волн. Электромагнитное поле в волноводе не является чисто поперечным, а имеет продольные составляющие.

Если даны две параллельные проводящие плоскости, расположенные на расстоянии a друг от друга, то между ними могут распространяться волны, если

$$\cos \theta_n = \frac{n\pi}{ka} = \frac{n\lambda_0}{2a} = \frac{n\pi}{a\omega}, \quad (7)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве. Отсюда ясно, что движение волны по волноводу возможно, если

$$\cos \theta_n = \frac{n\lambda_0}{2a} \leq 1, \quad (8)$$

поэтому для каждого n существует наибольшая критическая длина волны и наименьшая критическая частота, при которых волна еще может проходить через волновод. Для $n = 1$:

$$\omega_{кр} = \frac{\pi c}{a} \quad (9)$$

$$\lambda_{кр} = 2a. \quad (10)$$

Связать длины волн в волноводе, свободном пространстве и критическую длину волны можно с помощью уравнения

$$\frac{1}{\lambda_v^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_{кр}^2}. \quad (11)$$

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

$$E_{max} = E_0(1 + \rho), E_{min} = E_0(1 - \rho). \quad (12)$$

Расстояние l между соседними узлами (или пучностями) составляет

$$l = \frac{\lambda_B}{2}. \quad (13)$$

Отношение

$$K = \frac{E_{max}}{E_{min}} \quad (14)$$

называется коэффициентом стоячей волны. Коэффициент отражения от препятствия по амплитуде

$$\rho = \frac{K - 1}{K + 1}. \quad (15)$$

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

1 Волны в волноводе при частоте выше критической

Экспериментальная установка. Схема для исследования структуры волн в волноводе при частоте выше критической представлена на рисунке 2.

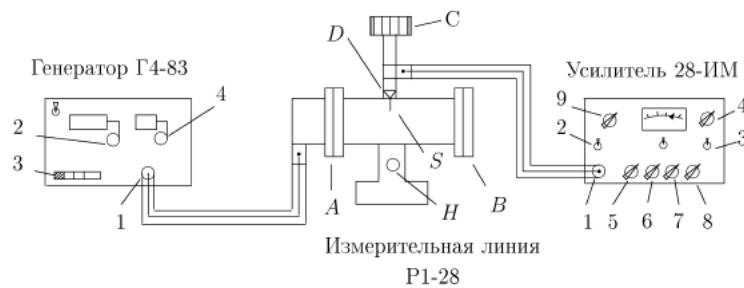


Рисунок 2 – Схема для исследования структуры волн СВЧ

1.1 Определение длины волны СВЧ-сигнала в волноводе

После калибровки прибора, выставлена рабочая частота $\nu = 9320$ МГц. По формуле ниже получается, что выставленная частота выше критической ($a = 23$ мм)

$$\nu_{кр} = \frac{c}{2a} = 6522 \pm 284 \text{ МГц}$$

Снимая зависимость $U(z)$ при перемещении зонда измерительной линии по всему диапазону, получается следующая зависимость, представленная на рисунке 3. По этому графику и по формуле (13) длина волны

$$\lambda_B = 44 \pm 1 \text{ мм}$$

Длина волны в свободном пространстве

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} = 32 \text{ мм.}$$

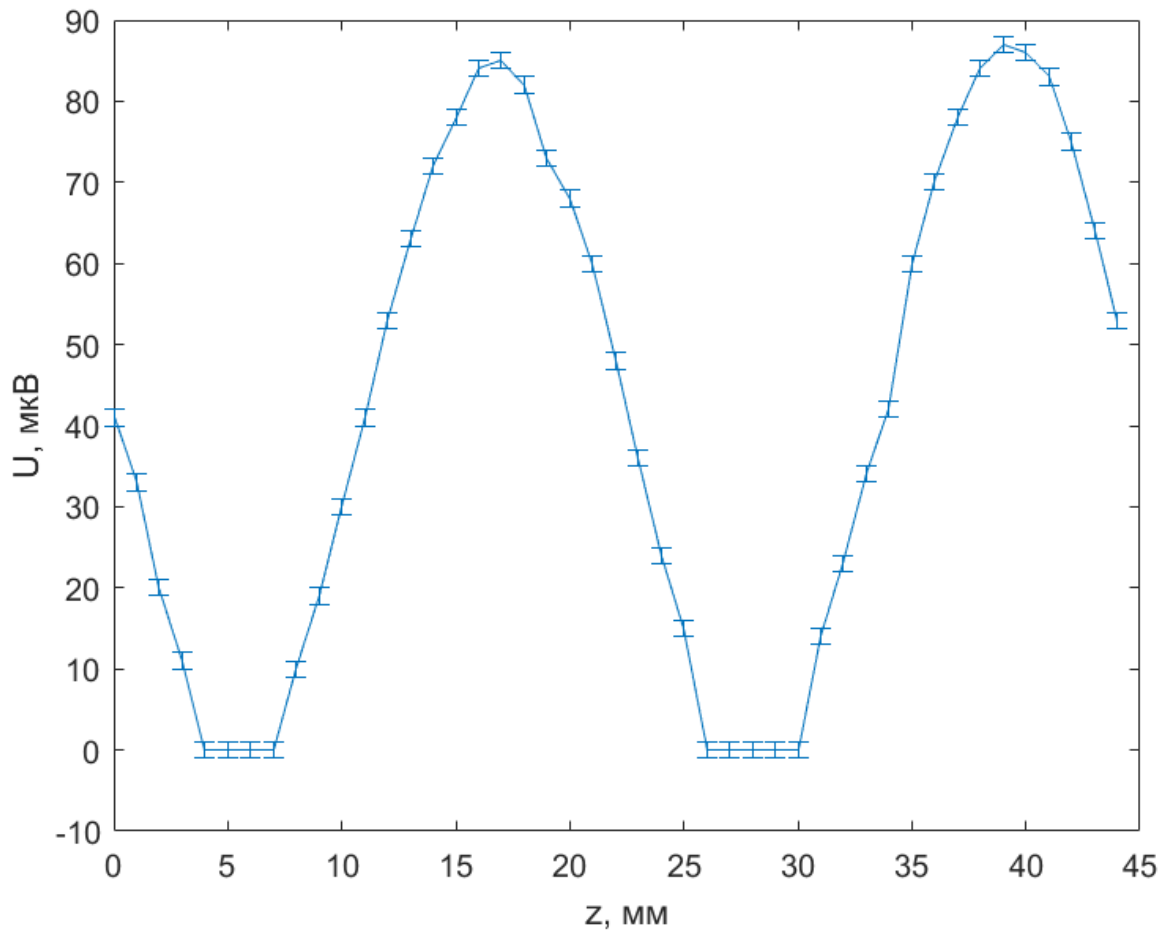


Рисунок 3 – График зависимости $U(z)$

По формуле (11) теоретическое значение длины волны в волноводе

$$\lambda_{\text{в теор}} = 45 \pm 2 \text{ мм.}$$

Значение, полученное в ходе эксперимента, согласуется с рассчитанным теоретически.

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}} = 0,7.$$

Фазовая скорость волны по формуле (1)

$$v_{\text{ф}} = \lambda\nu = (4,1 \pm 0,9) \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Групповая скорость по соотношению $u \cdot v_{\text{ф}} = c^2$

$$u = (2,19 \pm 0,05) \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

1.2 Определение коэффициента отражения

Открытый фланец

$$U_{\text{max}} = 25 \text{ мкВ}$$

$$U_{min} = 10 \text{ мкВ}$$

Считая детектирование квадратичным, т.е

$$U \sim E^2,$$

по формулам (14) и (15) коэффициент отражения получается равен

$$\rho = 0,22 \pm 0,05$$

Аналогично с отрезком волновода с поглощающей нагрузкой

$$U_{max} = 18 \text{ мкВ}$$

$$U_{min} = 14 \text{ мкВ}$$

$$\rho = 0,063 \pm 0,011$$

2 Колебания поля в волноводе при частоте ниже критической

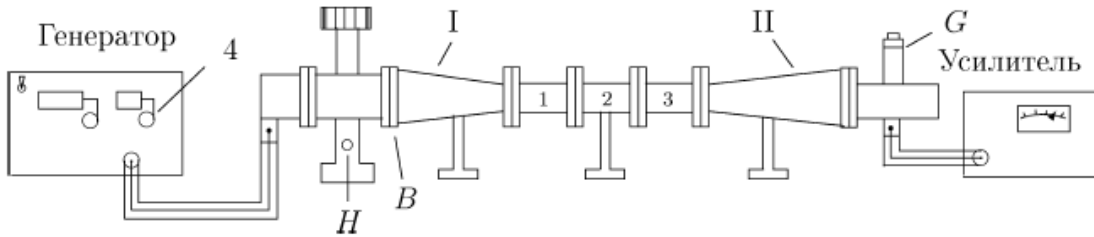


Рисунок 4 – Схема для исследования затухания

Экспериментальная установка. 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 (см рисунок 4).

Ослабление интенсивности сигнала $\gamma = \beta z$ принято измерять в децибелах (дБ), где z - пройденное расстояние, β - некоторый коэффициент.

$$\gamma = 10 \lg \frac{W_0}{W}$$

В закритическом волноводе при квадратичном детектировании интенсивность сигнала падает по закону

$$U \sim E^2 \sim e^{-2\alpha z}, \quad (16)$$

где α – коэффициент затухания:

$$\alpha = \frac{1}{c} \sqrt{\omega_{кр}^2 - \omega^2} = \frac{\pi}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_0} \right)^2} \quad (17)$$

2.1 Измерение коэффициента затухания

Теоретически рассчитанное по формуле (17) α , при $a = 16$ мм

$$\alpha = 2,12 \pm 0,15 \text{ дБ/см}$$

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{c}{2a} = 9375 \text{ МГц}$$

Поддерживаемое напряжение $U = 74$ мкВ

γ , дБ	суммарная длина отрезков волновода, см
$20 \pm 0,1$	$44 \pm 0,1$
$23,6 \pm 0,1$	$38,3 \pm 0,1$
$33,5 \pm 0,1$	$34,3 \pm 0,1$
$39,8 \pm 0,1$	$29,3 \pm 0,1$

Таблица 1 – Зависимость $\gamma(z)$

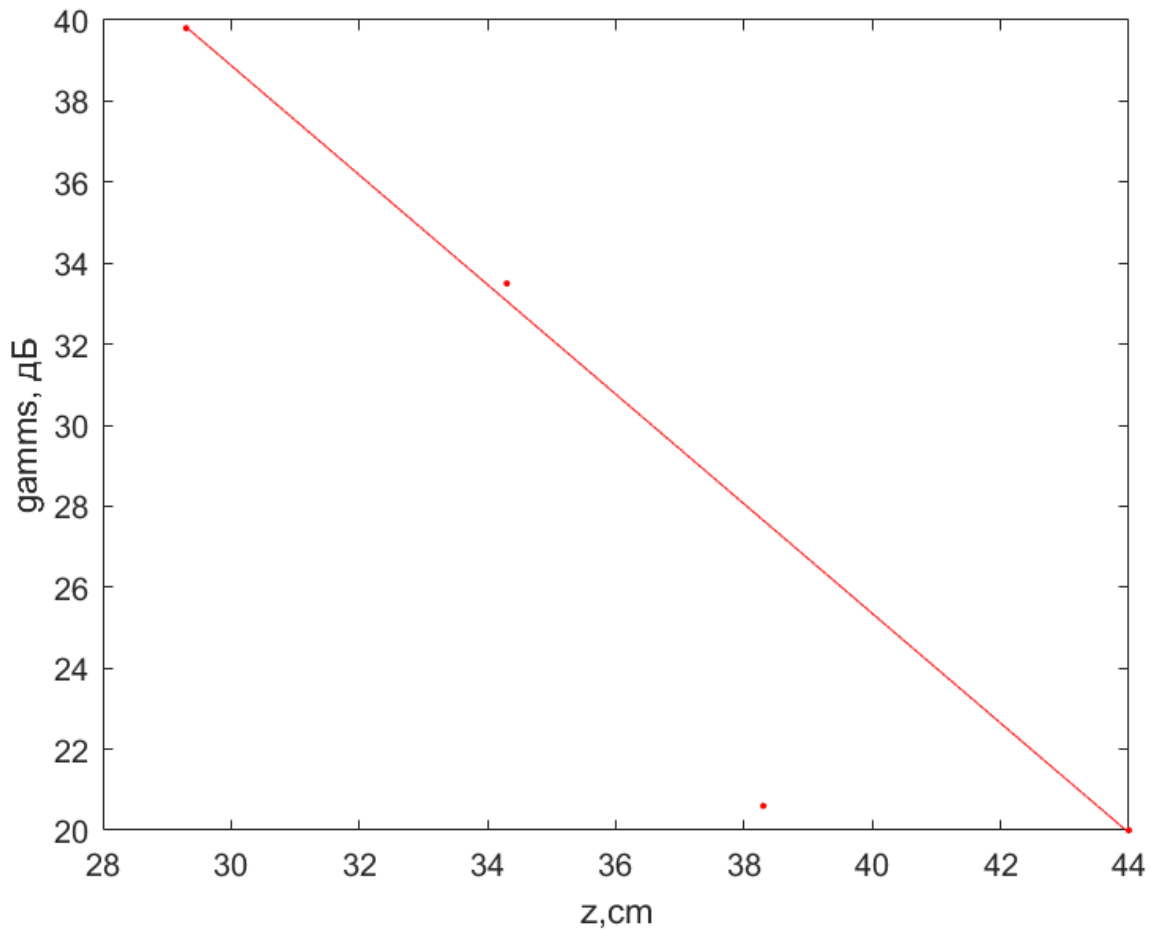


Рисунок 5 – График зависимости $\gamma(z)$

С помощью МНК по трем точкам, лежащим на одной прямой, было получено

$$\beta = \frac{\Delta\gamma}{\Delta z} = -1,35 \pm 0,02 \text{ дБ/см}$$

По формуле

$$\alpha \approx 1,15\beta \quad (18)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1,15} = 1,85 \pm 0,13 \text{ дБ/см} \quad (19)$$

3 Вывод

В ходе данной лабораторной работы удалось ознакомиться с методами получения и анализа э.м. волн СВЧ-диапазона

4 Литература

1. Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие в трех томах. Т. 2. Электричество и магнетизм. 2-е изд., перераб и дополн. / Никулин М.Г., Попов П.В, Нозик А.А. и др.; Под ред. А.В. Максимычева, М.Г. Никулина. – М.: МФТИ, 2019. – 370 с