

Работа № 2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

Цель работы – ознакомиться: 1) с характеристиками поля в свободном пространстве и их измерением; 2) с влиянием проводящих поверхностей на характеристики поля; 3) с принципами формирования направляемых волн в волноводах.

Оборудование: генератор волн 3–х сантиметрового диапазона (клистрон типа К-19, К-27 с блоком питания или генератор на диоде Гана), измерительная линия, излучающий рупор, диодные приемные антенны, набор плоских пластин с изменяемым расстоянием.

1. Введение

1.1. Приемные и излучающие антенны.

Простейший излучатель СВЧ волн – открытый конец волновода. Он излучает расходящийся "конус" электромагнитного поля, который характеризуется широкой *диаграммой направленности*.

а). *Диаграмма направленности* определяет распределение интенсивности поля в окружающем пространстве (см. "Методическое пособие. Приложение 1" § 1.4.). В плоскости поля **H** и в плоскости поля **E** (рис. 1, а) диаграмма может иметь различный угол раскрытия θ_{max} , который зависит от соотношения размеров рупора (рис. 1). Главный лепесток диаграммы направленности рупора (рис. 1, в) гораздо уже, чем открытого конца волновода (рис. 1, б).

Нужно иметь в виду, что изображенные на рис. 1 диаграммы характеризуют пространственное распределение интенсивности в *дальней зоне* антенны, т. е. при условии, что расстояния от излучающей антенны до точки измерения поля $R \gg a, b, \lambda_0$ (обозначения ясны из рис. 1). Вблизи антенны (в частности, вблизи рупора) диаграмма излучения будет гораздо более "изрезанной": на ней будут наблюдаться многочисленные боковые лепестки излучения, подобные изображенному на диаграмме рис. 1, в. Поэтому, если мы желаем иметь в области измерения более или менее однородное по интенсивности поле, то должны располагать исследуемый объект достаточно далеко от антенны (по крайней мере дальше чем $10\lambda_0$).

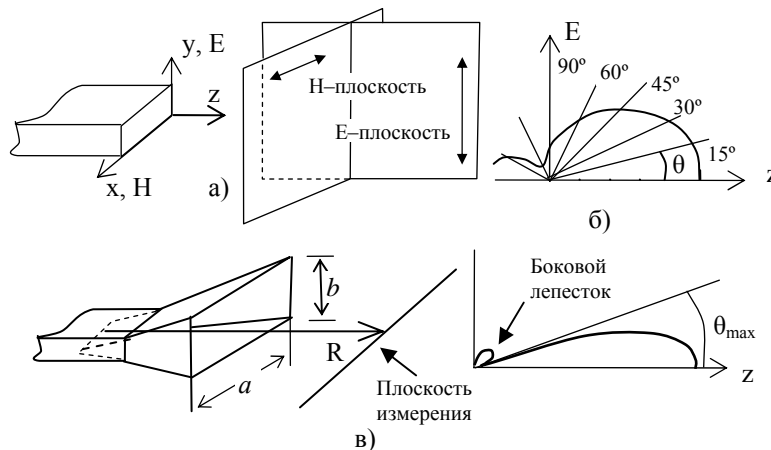


Рис. 1. Диаграмма направленности волновода и рупора.

а) система координат с плоскостями **E**, **H** и типы рупоров, б) диаграммы направленности открытого конца волновода, в) диаграмма направленности рупора.

б). *Приемные антенны излучения* (см. МП § 1.4.3). При не слишком высокой мощности излучения для приемных и излучающих антенн справедлива *теорема взаимности*: их характеристики (в частности диаграммы направленности) одинаковы как для излучения, так и для приема. Рупорная антенна в качестве приемной "собирает" и интегрирует поле со значительной поверхности, равной площади раскрытия рупора. В наших работах часто необходимо измерять поле "в точке". Для этой цели наиболее подходящими являются антенны, называемые "симметричный вибратор" (рис. 2, а) или "штыревые" (несимметричный вибратор, изображенный на рис. 2, г).

б). *Приемные антенны излучения* (см. МП § 1.4.3). При не слишком высокой мощности излучения для приемных и излучающих антенн справедлива *теорема взаимности*: их характеристики (в частности диаграммы направленности) одинаковы как для излучения, так и для приема. Рупорная антенна в качестве приемной "собирает" и интегрирует поле со значительной поверхности, равной площади раскрытия рупора. В наших работах часто необходимо измерять поле "в точке". Для этой цели наиболее подходящими являются антенны, называемые "симметричный вибратор" (рис. 2, а) или "штыревые" (несимметричный вибратор, изображенный на рис. 2, г).

Симметричный вибратор – это два коротких проводника длиной $l \leq \lambda_0/2$, расположенные вдоль направления поляризации **E**. К их ближним концам в нашем случае подключен полупроводниковый СВЧ диод. В наших работах часто необходимо измерять поле "в точке". Для этой цели наиболее подходящими являются антенны, называемые "симметричный вибратор" (рис. 2, а) или "штыревые" (несимметричный вибратор, изображенный на рис. 2, г).

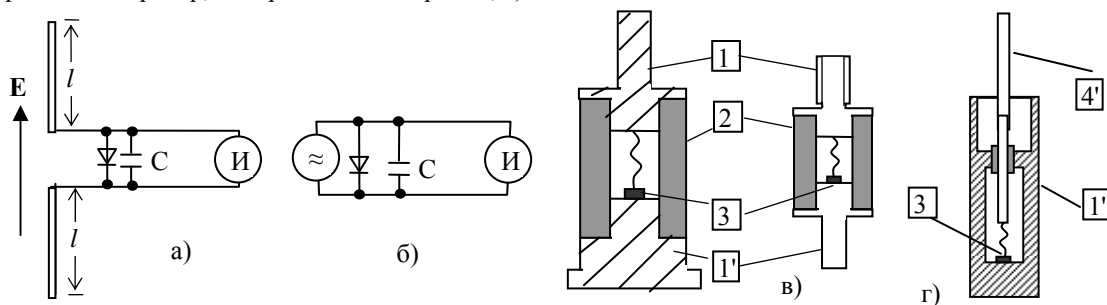


Рис. 2. Диодные приемники излучения

а) симметричный вибратор, б) эквивалентная электрическая схема приемника, в) и г) типы используемых СВЧ диодов: 1 – металлические выводы, 2 – керамическая трубка, 3 – полупроводниковый кристалл, 4 – "штырь", одетый на внутренний ввод коаксиального диода.

Симметричный вибратор – это два коротких проводника длиной $l \leq \lambda_0/2$, расположенные вдоль направления поляризации **E**. К их ближним концам в нашем случае подключен полупроводниковый СВЧ

– Во-первых, под каким углом падает излучение, точнее – кто или что "выбирает" этот угол в нашем эксперименте, в котором мы располагаем проводящие пластины в плоскости, параллельной направлению распространения излучения oZ ? Ответ: этот угол определяет заданное нами расстояние между пластинами d . Наличие проводящих пластин налагает нулевые граничные условия на тангенциальные составляющие поля. Следовательно, волна "автоматически выберет" такие углы падения и отражения, при которых обеспечиваются граничные условия. Это эквивалентно условию $d = m(\lambda_0/2)$, где m – целое число. Физически это обеспечивается двумя факторами: 1) тем, что фазовая скорость распространения волны в *проводящей* стенке v_m всегда больше соответствующей скорости в свободном пространстве v_0 :

$$v_m = v_0 / \sin \varphi,$$

где v_m – это скорость, с которой интерференционная картина "скользит" вдоль проводящей поверхности, обеспечивая *направленную* бегущую волну; 2) тангенциальная составляющая поля E на поверхности проводящей плоскости равна нулю.

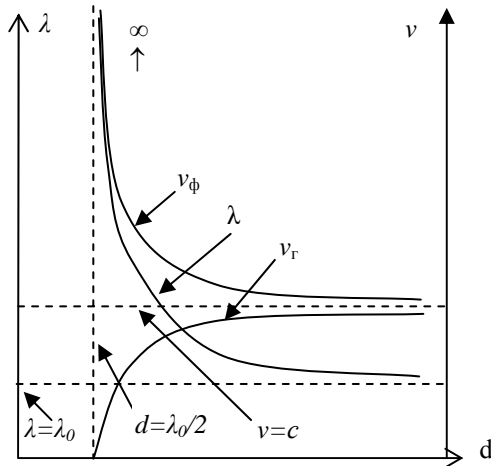


Рис. 4. Зависимость длины волны λ , фазовой v_ϕ и групповой v_g скорости от расстояния между пластинами d .

Из рассмотренных условий очевидно, что фазовая скорость и длина волны между пластинами будут зависеть от расстояния между ними d . Вид этой зависимости приведен на рис. 4.¹ С приближением расстояния между пластинами к значению $a = \lambda_0/2$ длина волны и фазовая скорость стремится к бесконечности, а групповая – к нулю. При этом волна становится чисто мнимой и поле затухает по экспоненциальной зависимости с расстоянием вдоль oZ . (Напомним, все вышесказанное справедливо для волны, вектор поляризации которой параллелен проводящим плоскостям).

– Во-вторых, когда мы говорим о падении *плоской* волны на поверхности, изображенные на рис. 3, то надобно понимать, что это *модельная* теоретическая картина поля в волноводе (между стенками), а не само поле. Само поле в каждый момент и в каждой точке представлено суперпозицией этих полей (падающей и отраженной плоской волны). Это результирующее поле имеет *эллиптическую* поляризацию и составляющую поля (E или H)

вдоль направления распространения (вдоль оси oZ).

– В-третьих, картина поля вблизи входной и выходной поверхности пространства между пластинами несколько отличается от описанной из-за наличия дифракции поля на краях пластин.

2. Поле между пластинами, перпендикулярными вектору поляризации падающей волны. В этом случае тангенциальная составляющая поля E , параллельная поверхности пластин, отсутствует, а потому пластины не влияют на характер поля. Его параметры (фазовая и групповая скорость и длина волны) не будут зависеть от расстояния между пластинами.

При экспериментальной проверке распространения поля между пластинами, перпендикулярными вектору поляризации, нужно, однако, помнить о двух фактах. Во-первых, остается в силе замечание предыдущего пункта о дифракции на входной и выходной щели между пластинами. Во-вторых, проводящие поверхности могут влиять на *диаграмму направленности* диодного приемника. Поэтому количественные результаты, полученные для расстояний между пластинами d , сравнимых с длиной диодной "антенны", уже не описываются простыми теоретическими формулами.

1. 3. Описание установки

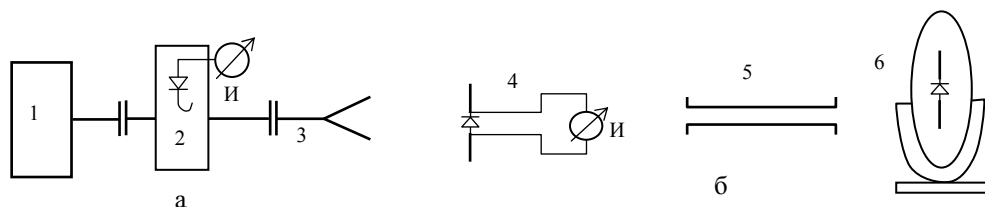


Рис. 2 Схема установки

а. Генератор с передающей линией: 1. Генератор. 2. Измерительная линия с индикатором. 3. Излучающий рупор.

б) Дополнительные устройства: 4. Диодный приемник. 5. Раздвижные пластины (горизонтальные и вертикальные). 6. Вращающийся диодный приемник.

Установка состоит из генератора поля 3-х сантиметрового диапазона и передающего тракта, включающего измерительную линию. В качестве генератора используется клистрон с блоком питания, либо генератор на диоде Гана. К измерительной линии подключается рупор, либо металлическая заглушка в зависимости от выполняемого упражнения. К установке прилагаются диодные приемники с различными

¹ График носит не количественный, а качественный характер! При $\lambda = \lambda_0$ должно выполняться условие $(v_\phi v_g)^2 = c^2$.

держателями из пенопласта, устройство для снятия диаграммы направленности рупора, вращающийся диодный приемник и две пары раздвижных проводящих пластин.

2. Задания

2. 1. Изучение распределения и характера поля пирамидального рупора

Задание 1. Используя диодный приемник излучения (симметричный вибратор) на пенопластовом держателе качественно "просмотрите" картину поля в ближней и дальней зоне рупора: а) состояние поляризации, б) наличие/отсутствие составляющей поля вдоль оси OZ , в) зависимость интенсивности от расстояния от рупора вдоль OZ .

Задание 2. Снимите и постройте в полярных координатах диаграмму направленности рупора в H -плоскости в дальней зоне. Определите зону поля в которой его интенсивность однородна с точностью, не хуже 10%. В этой зоне (на этом расстоянии по оси OZ) вы будете располагать исследуемые пары пластин в последующих упражнениях.

Задание 3. С помощью диодного приемника, закрепленного на вращающемся пенопластовом диске, снимите зависимость интенсивности от угла φ (см. рис. 5). Проверьте справедливость формулы $E_\varphi = E_0 \cos \varphi$. Обратите внимание на то, что показания прибора, к которому подключен диодный приемник, пропорциональны интенсивности, а не напряженности поля. Выполнение формулы означает, что диодная антенна является приемником, чувствительным к поляризации излучения: максимум ее показаний соответствует ее направлению вдоль направления вектора поляризации поля. Этим свойством диодных приемников мы будем пользоваться в других упражнениях.

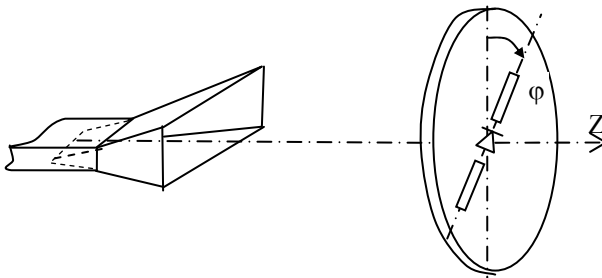


Рис. 5. Проверка диаграммы направленности диодной антенны.

2. 2. Проверка формулы для соотношения длины волны в волноводе и свободном пространстве

Задание 4. Используя свойства стоячих волн, измерьте длину волны в волноводе и свободном пространстве с точностью, не хуже 5%. Длину волны в свободном пространстве определите с помощью диодного приемника, а в волноводе – с помощью измерительной линии. Описание принципа действия измерительной линии см. "Методическое пособие. Приложение 1" § 1.3. 3. Проверьте справедливость формулы

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (1)$$

где a – внутренний размер широкой стенки волновода.

2. 3. Исследование влияния проводящих поверхностей на параметры поля

Задание 5. Исследуйте зависимость длины волны от расстояния между проводящими поверхностями, параллельными вектору поляризации поля в свободном пространстве. Постройте график, соответствующий рис.4.

Задание 6. Проверьте справедливость утверждения об экспоненциальном затухании поля между пластинами, когда расстояние меньше критической длины волны, определяемой формулой (1).

Задание 7. Исследуйте зависимость длины волны от расстояния между проводящими поверхностями, перпендикулярными вектору поляризации поля в свободном пространстве. Объясните полученную зависимость.