#### Работа № 2

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И НАПРАВЛЯЮ-ЩИХ 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  $\boldsymbol{H}$  и в плоскости поля  $\boldsymbol{E}$  (рис. 1, а) диаграмма может иметь различный угол раскрыва  $\theta_{max}$ , 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 ан-

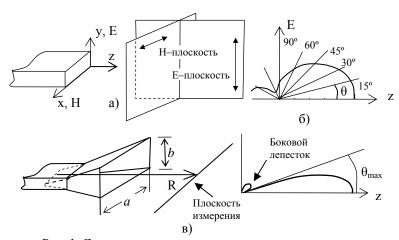


Рис. 1. Диаграмма направленности волновода и рупора.
а) система координат с плоскостями Е, Н и типы рупоров, б) диаграммы направленности открытого конца волновода, в) диаграмма направленности рупора.

тенны до точки измерения поля R  $>> a, b, \lambda_0$  (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  $10\lambda_0$ ).

б). *Приемные антенны излучения* (см. МП § 1.4.3). При не слишком высокой мощности излу-

чения 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 раскрыва 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).

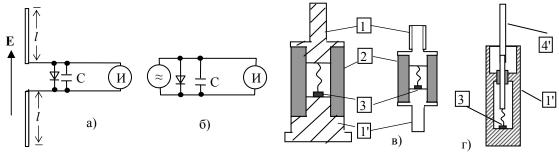


Рис. 2. Диодные приемники излучения

 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  $l \le \lambda_0/2$ , расположенные вдоль направления поляризации E. К их ближним концам в нашем случае подключен полупроводниковый СВЧ

диод (рис. 2, в, г). Для излучения в 3-сантиметровом диапазоне размеры металлических выводов СВЧ диодов (рис. 2, в) сами являются "плечами" вибратора. Для излучения с более короткой длиной волны эти типы диодов обладают слишком малой чувствительностью. Поэтому в этом случае в качестве приемника используется СВЧ диод коаксиальной конструкции, изображенный на рис. 2, г. На его внутренний вывод одевается короткая трубочка 4, составляющая вместе с корпусом 1 несимметричный вибратор.

Диоды с помощью гибких проводов подключается к измерительному прибору. Общая эквивалентная схема приемника излучения представляет собой однополупериодный выпрямитель (рис. 2, б), емкость С которого образована проводами, соединяющими антенну с измерительным прибором (микроамперметром, входом усилителя, осциллографом и т. д.). Используемые детекторные СВЧ диоды обладают квадратичной вольт—амперной характеристикой. Поэтому, если в качестве измерителя использован микроамперметр, то в его цепи будет протекать ток, пропорциональный квадрату амплитуды, т. е. пропорциональный интенсивности поля в той точке, в которую помещен диод.

Вибраторные антенны **чувствительны** к поляризации поля: для максимальной чувствительности направление поляризации должно совпадать с направлением плеч вибратора. В направлении вдоль плеч вибратора расположена "мертвая зона" приема. Поэтому с помощью диодного измерителя мы можем определять не только интенсивность поля, но и направление его поляризации.

Диэлектрическая проницаемость пенопласта в используемом диапазоне частот СВЧ волн весьма близка к диэлектрической проницаемости воздуха. Поэтому на границе раздела воздух—пенопласт не создается отражений, что позволяет использовать этот материал для различных не отражающих конструктивных элементов. В частности, в качестве "держателей" СВЧ индикаторов поля.

## 1. 2. Электромагнитное поле вблизи проводящих поверхностей

Рассмотрим случай падения плоской волны на проводящую поверхность под некоторым углом  $\phi$  (рис. 3). На рисунке представлен "мгновенный снимок" волны. Пунктиром проведены *поверхности равной фазы* падающей и отраженной волны, нанесенные через  $\lambda_0/4$ . В треугольнике OBO' пересечения падающей и отраженной волн будет наблюдаться интерференционная картина.

**1.** *Поле между пластинами, параллельными вектору поляризации*. Поскольку в этом случае на поверхности проводящей плоскости тангенциальная компонента электрического поля должна быть равна нулю, то такие же нулевые значения будут и в параллельной плоскости AA'. Это следует из того, что фаза излучения в плоскости AA' отличается от фазы на поверхности пластины на  $\pi$ , как ясно из рисунка. Но в таком случае мы можем без искажения картины поля поместить в плоскости AA' идеально проводящую пластину. Это и есть наша вторая пластина, используемая в данной работе.

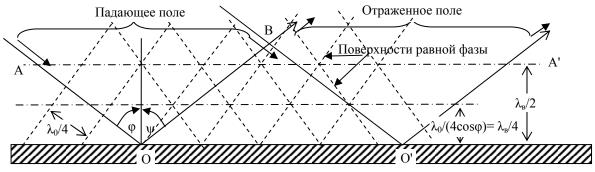


Рис. 3. Поле вблизи проводящей поверхности.

Сплошные линии – падающая и отраженная волна; пунктирные линии – поверхности равной фазы излучения; AA' – поверх-- - - ность, проведенная через узлы интерференционной картины, в которых поле E равно нулю.

Однако появлением второй пластины на линии АА' вносит одну существенную разницу в *распространение* поля. Если при наличии одной пластины отраженное поле уходило в свободное пространство, причем интерференция была только в пространстве треугольника OBO', то теперь оно будет многократно отражаться от второй пластины. Многократное отражение поля от двух пластин обеспечит *направленное* его распространение между проводящими поверхностями.

Таким образом две проводящие пластины, параллельные вектору поляризации волны, представляют собой металлический волновод, подобный нашему прямоугольному. Аналогия будет еще более полной, если расстояние между пластинами d будет равно длине широкой стенки 3—х сантиметровом волноводе a=23 мм. Отсюда следует так называемая модель парциальных волн для волновода, согласно которой поле в волноводе представляет собой суперпозицию двух плоских поперечных электромагнитных волн, поверхности равной фазы которых наклонены к направлению распространения волны оZ под некоторым углом  $\phi$ . Эта модель неплохо описывает многие физические явления и характеристики поля в волноводе. Однако, это всего лишь модель. Реально парциальные волны существуют не более, чем любая тройка компонент, на которую можно разложить векторную физическую величину.

В рассмотренной модели есть несколько "подводных камней".

– 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  $d = m(\lambda_{\theta}/2)$ , где m – целое число. Физически это обеспечивается двумя факторами: 1) тем, что фазовая скорость распространения волны в npoводящей стенке  $v_{M}$  всегда больше соответствующей скорости в свободном пространстве  $v_{0}$ :

$$v_{\rm M} = v_0 / \sin \varphi$$

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.

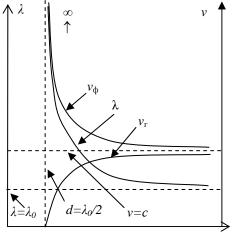


Рис. 4. Зависимость длины волны  $\lambda$ , фазовой  $v_{\phi}$  и групповой  $v_{\Gamma}$  скорости от расстояния между пластинами d.

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 оZ. (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 (Е или Н)

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

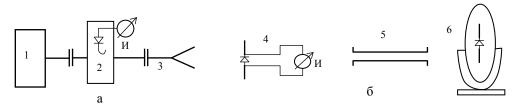


Рис. 2 Схема установки

а. Генератор с передающей линией: 1. Генератор. 2. Измерительная линия с индикатором . 3. Излучающий рупор. 6) 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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> График носит не количественный, а качественный характер! При  $\lambda = \lambda_{e}$  должно выполняться условие  $(v_{d}, v_{c})^{2} = c^{2}$ .

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 оZ, в) зависимость интенсивности от расстояния от рупора вдоль оZ.

**Задание 2**. Снимите и постройте в полярных координатах диаграмму направленности рупора в Н-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 оZ) вы будете располагать исследуемые пары пластин в последующих упражнениях.

Задание 3. С помощью диодного приемника, закрепленного на вращающемся пенопластовом диске,

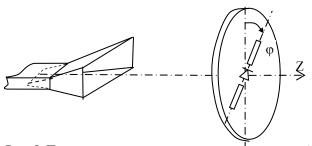


Рис. 5. Проверка диаграммы направленности диодной антенны.

снимите зависимость интенсивности от угла  $\phi$  (см. рис. 5). Проверьте справедливость формулы  $E_{\phi}=E_{0}cos\phi$ . 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.

# 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

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

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.