

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра «Антенн и устройств СВЧ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Методические указания к лабораторной работе №3
по дисциплине АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Минск 2005

УДК 621.396. 67 (075.8)

ББК 32. 845 я 73

И 85

Составители:

И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев

Исследование ферритовых вентиляей: Метод. указ. к лаб. раб. №3 по И 85 дисц. «Антенны и устройства СВЧ» для студ. спец. 39 01 01 «Радиотехника» всех форм обуч./ Сост. И.Н. Кижлай, А.В. Кухарев, Н.А. Чмырев, О.А. Юрцев.– Мн.: БГУИР, 2005. - 16 с.: ил.

В методических указаниях содержатся сведения о применении, принципах работы, конструкциях и разновидностях ферритовых вентиляей на различных типах линий передачи. Рассмотрены основные параметры ферритовых вентиляей, приведены методика их экспериментального определения и контрольные вопросы, которые помогают студентам самостоятельно овладеть данным разделом. Приведена методика выполнения лабораторной работы и оформления отчета.

Материал может быть рекомендован для студентов специальностей 39 01 02, 39 01 03 и 45 01 02 при изучении курсов, содержащих раздел “Устройства СВЧ”.

УДК 621.396. 67 (075.8)

ББК 32. 845 я 73

© Коллектив авторов, составление, 2005

© БГУИР, 2005

Содержание

1. Цель работы
 2. Общие сведения
 3. Измерение параметров ферритовых вентиляей
 4. Порядок выполнения работы
 5. Содержание отчета
 6. Контрольные вопросы
- Литература

Библиотека БГУИР

1 Цель работы

Ознакомление с применением, устройством и принципом действия ферритовых вентилях, исследование основных характеристик волноводного и коаксиального резонансного ферритового вентиля.

2 Общие сведения

Ферритовый вентиль (ФВ) - это невзаимное двухплечее устройство (четырёхполюсник), не создающее существенного затухания для волны, двигающейся по линии передачи в одном (прямом) направлении, но вносящее большое затухание для другого (обратного) направления движения энергии.

ФВ нашли широкое практическое применение для развязки различных участков СВЧ тракта между собой, а также исключения вредного влияния отражений на передающие и приемные устройства РЛС.

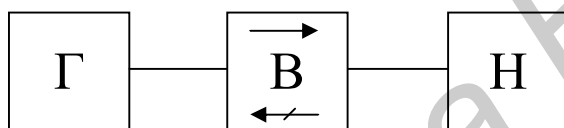


Рисунок 1 – Ферритовый вентиль в качестве развязывающего элемента

Применение ФВ резко улучшает работу генераторов СВЧ колебаний, способствует уменьшению затягивания частоты, улучшению спектра частот, устранению эффекта длинной линии и т.д. ФВ включается между генератором и нагрузкой (рисунок 1) таким образом, чтобы энергия падающей волны, распространяющейся от генератора к нагрузке, проходила ФВ в прямом направлении (оно указывается стрелкой на корпусе ФВ) с малыми потерями, а волна, отраженная от нагрузки и распространяющаяся в обратном направлении, поглощалась в вентиле.

Основными характеристиками ФВ являются: вносимые потери в прямом направлении $S_{пр}$, затухание в обратном направлении $S_{обр}$, диапазон и полоса рабочих частот, коэффициент стоячих волн (КСВ) K_v входа в полосе рабочих частот.

1 Прямые потери $S_{пр}$ - выраженное в децибелах отношение мощности на входе к выходной мощности в прямом направлении:

$$S_{пр} = 10 \log P_{вх} / P_{вых} \text{ [дБ]}. \quad (1)$$

2 Обратное затухание $C_{обр}$ - выраженное в децибелах отношение мощности на входе к выходной мощности в обратном направлении:

$$C_{обр} = 10 \log P_{вх} / P_{вых} \text{ [дБ]}. \quad (2)$$

Эффективность вентиль (качество развязки) можно характеризовать вентильным отношением (добротностью) - отношением ослаблений обратной и прямой волн, выраженных в децибелах:

$$V = C_{обр} / C_{пр}. \quad (3)$$

В реальных конструкциях ФВ $C_{пр}$ обычно составляет величину от 0,1 до 1 дБ, а $C_{обр}$ - от 10 до 70 дБ. Коэффициент стоячей волны K_v при этом не превышает 1,1.

В зависимости от назначения и условий работы ФВ выбирают с такими характеристиками, чтобы они в полной мере удовлетворяли определенным требованиям, т.е. необязательно имели одновременно высокие показатели по всем характеристикам.

Основным “рабочим телом” ФВ является ферритовая пластина или ферритовый стержень. Ферриты представляют собой твердые тела или монокристаллы, образованные спеканием порошка окиси железа с окислами никеля, цинка, марганца, хрома, меди и др. Характерным свойством ферритов является сочетание электрических свойств хорошего диэлектрика ($\mu=10-70$ и $\sigma=0,0005-0,002$) с магнитными свойствами ферромагнетика. Начальная относительная магнитная проницаемость СВЧ ферритов в слабых низкочастотных полях $\mu=10-3000$. На СВЧ при отсутствии постоянного магнитного поля начальная μ ферритов лишь незначительно отличается от единицы.

Поведение ферритов на СВЧ в присутствии внешнего постоянного магнитного поля может быть рассмотрено с учетом собственных механического и магнитного моментов электрона.

Если электрон рассматривать как вращающуюся электрически заряженную массу, то во многих отношениях он напоминает механический гироскоп (волчок), обладающий собственным механическим моментом количества движения S и магнитным спиновым моментом M , возникающими благодаря вращению электрона и направленными в противоположные стороны. При наложении внешнего постоянного магнитного поля напряженностью H_0 , которое не совпадает с направлением M (рисунок 2), на электрон начнет действовать пара сил, т.е. момент вращения. Под действием этого момента вращения спины электрона стремятся ориентироваться по направлению приложенного поля, прецессируя подобно гироскопу вокруг оси, совпадающей по направлению с H_0 , образуя с ним правовинтовую систему.

Частота свободной прецессии, называемая частотой ферромагнитного резонанса, может быть определена из выражения

$$\omega_0 = \gamma H_0, \quad (4)$$

где H_0 - напряженность действующего постоянного магнитного поля в эрстедах;

$\gamma = 2,8$ МГц/эрстед - гиромагнитное отношение электрона, т.е. отношение его магнитного M и механического S моментов.

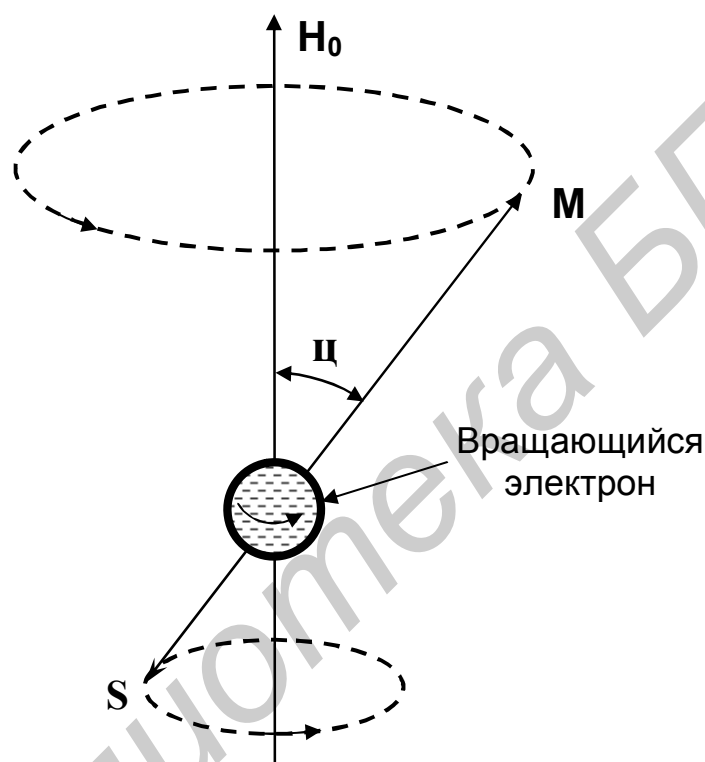


Рисунок 2 – Свободная прецессия магнитного момента электрона в постоянном магнитном поле

При отсутствии потерь свободная прецессия продолжалась бы при неизменном угле φ . В реальных же ферромагнитных средах всегда имеют место потери, поэтому угол φ начинает быстро уменьшаться (конец вектора M двигается по свертывающейся спирали). Через время порядка 10^{-8} с свободная прецессия практически полностью исчезает, векторы магнитных спиновых моментов всех электронов устанавливается параллельно H_0 , феррит оказывается намагниченным до насыщения.

Если теперь воздействовать на такой феррит высокочастотным магнитным полем H , с круговой поляризацией и частотой ω в направлении, перпендикулярном H_0 (рисунок 3), то при совпадении направлений вращения M и H в

феррите наблюдается так называемая вынужденная прецессия, нарастание амплитуды которой (увеличение угла φ) ограничено магнитными потерями. В результате наступает такой режим ($\varphi = const$), при котором энергия высокочастотного магнитного поля рассеивается в виде тепла в кристаллической решетке феррита.

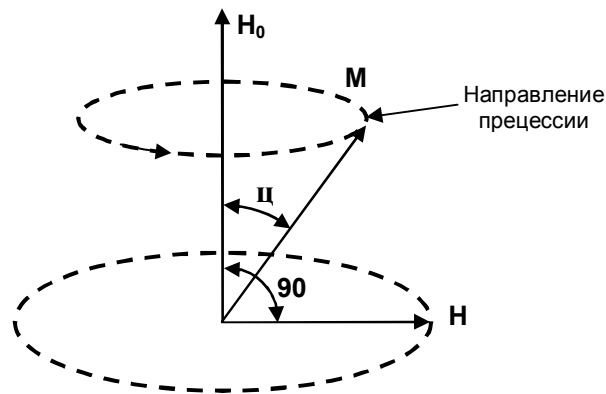


Рисунок 3 - Вынужденная прецессия магнитного момента электрона

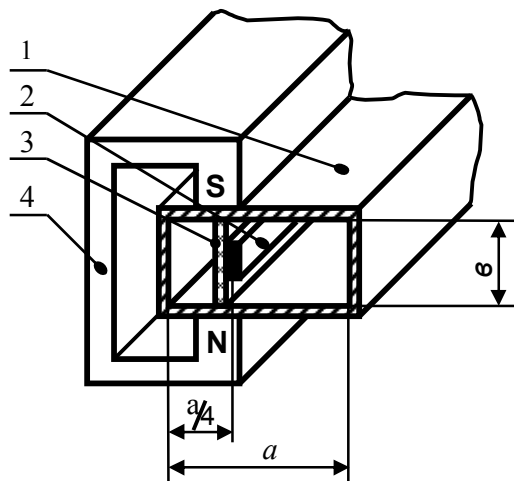
При $\omega \neq \omega_0$ эффект взаимодействия уменьшается и потери в феррите снижаются. В случае противоположных направлений вращения M и H поле СВЧ и вещество феррита практически не взаимодействуют. Феррит для такого поля является диэлектриком и поглощения энергии в феррите практически не происходит. Описанное явление называется явлением ферромагнитного резонанса и играет важную роль в теории и практике применения ферритов на СВЧ.

Рассмотренное явление невзаимного резонансного поглощения электромагнитных волн при ферромагнитном резонансе в поперечно намагниченном феррите используется в исследуемых в данной работе резонансных волноводах и коаксиальных ферритовых вентилях.

Резонансный ФВ в прямоугольном волноводе

Конструкция резонансного ФВ, исследуемого в данной работе, приведена на рисунке 4.

Для получения невзаимного эффекта в соответствии с изложенной выше теорией при конструировании резонансного ФВ на базе прямоугольного волновода, работающего на волне H_{10} , желательно расположить феррит в том участке волновода, где высокочастотное магнитное поле имеет круговую поляризацию.



1 - прямоугольный волновод; 2 - тонкая ферритовая пластина;
3 - диэлектрическая пластина; 4 - постоянный магнит

Рисунок 4 - Волноводный ФВ на эффекте ферромагнитного резонанса

Хотя волна H_{10} в целом имеет линейную поляризацию, как видно из рисунка 5, существуют две продольные плоскости $x = const$, параллельные узкой стенке волновода, где высокочастотное магнитное поле имеет круговую поляризацию, причем направления вращения H в этих плоскостях взаимно противоположны и зависят от направления движения волны по волноводу. Эти плоскости расположены на расстоянии $x = \frac{a}{\pi} \arctg \frac{\lambda_B}{2a}$ (т.е. приблизительно $x = a/4$) от узких стенок волновода.

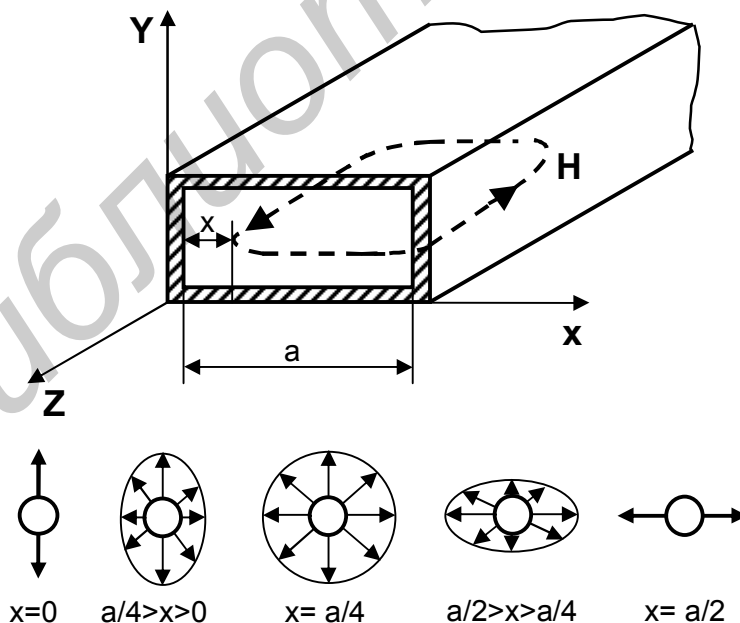


Рисунок 5 - К рассмотрению поляризации высокочастотного магнитного поля при волне типа H_0 в различных сечениях прямоугольного волновода

Поместив в одну из этих плоскостей ферритовую пластинку и обеспечив посредством постоянного магнита постоянное магнитное поле H_0 такой величины, чтобы выполнялось условие поперечного ферромагнитного резонанса, получим, что феррит поглотит мощность волны, создающей правополяризованное высокочастотное магнитное поле, пропуская по тому же отрезку волновода волну, распространяющуюся в противоположном направлении, практически без ослабления. Таким образом, данный волновод с ферритовой пластинкой является вентиляем.

При изменении частоты электромагнитных колебаний меняется соотношение между продольными и поперечными составляющими высокочастотного магнитного поля. Сечение с круговой поляризацией при увеличении частоты смещается в сторону узкой стенки, а при уменьшении частоты - к центру волновода. Феррит оказывается не в оптимальном положении на всех частотах, кроме резонансной, что влечет за собой увеличение $C_{пр}$ и уменьшение $C_{обр}$ ФВ.

Чтобы ослабить зависимость структуры поля от частоты, т.е. расширить частотный диапазон ФВ, в волновод вводят пластину из диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью и весьма малыми потерями, а тонкую ферритовую пластинку наклеивают либо непосредственно на диэлектрик (рисунок 6, а), либо на широкую стенку волновода рядом с диэлектриком (рисунок 6, б).

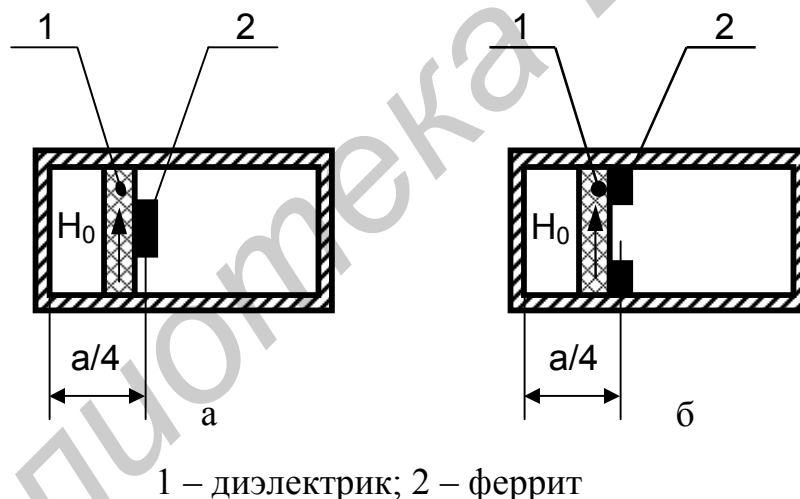


Рисунок 6 - Расположение диэлектрической и ферритовой пластин в прямоугольном волноводе

Диэлектрик концентрирует поле около феррита и позволяет получить в широкой полосе частот вентиляющее отношение, близкое к максимальному, при большом обратном затухании.

Вся СВЧ мощность обратной волны рассеивается в виде тепла в массе феррита, что ограничивает величину предельно допустимой средней мощности (единицы ватт). Для улучшения отвода тепла на стенки волновода предпочтительнее использовать вариант, приведенный на рисунке 6, б. Здесь ферритовые пластинки располагаются горизонтально в плоскости x . Этим уменьшается также опасность пробоя. Такие вентиля с относительно громоздкой магнитной

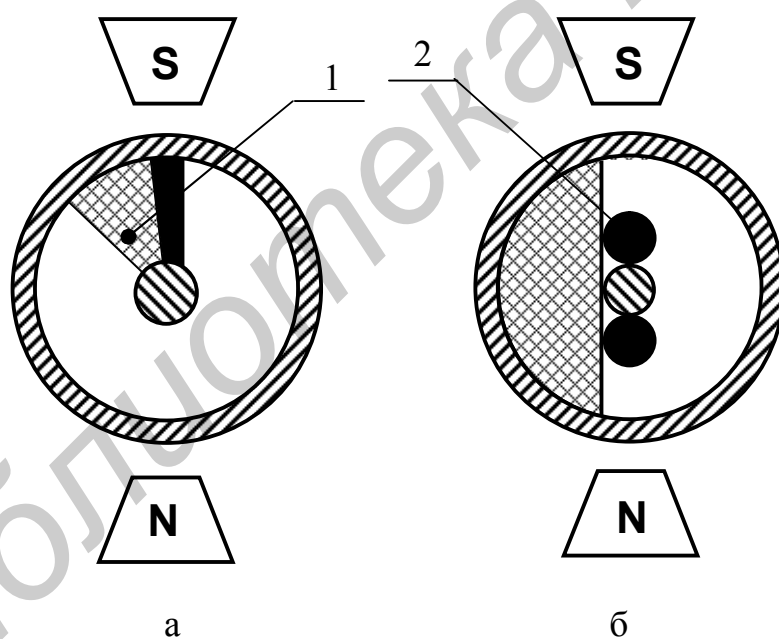
системой рекомендуется использовать в трактах с уровнем средней мощности до 100 Вт.

Для увеличения широкополосности ФВ можно также создавать неоднородное по длине ферритовой пластинки постоянное магнитное поле. Тогда каждой частоте рабочего диапазона будет соответствовать максимум резонансного поглощения в определенной части пластинки.

Коаксиальные ФВ

Особенностью конструкций коаксиальных ФВ является необходимость такого искажения поля Т-волны, чтобы в ней наряду с поперечной составляющей появилась продольная составляющая магнитного поля и результирующий вектор \mathbf{H} был поляризован по кругу. Для этого коаксиальную линию передачи частично заполняют диэлектриком с большим значением ε (рисунок 7, а).

Подбором размеров и формы диэлектрического вкладыша при заданных ε и f удается получить область круговой поляризации высокочастотного магнитного поля в феррите и тем самым снизить потери прямой волны и получить наибольшее вентиляционное отношение.



1 – диэлектрик; 2 – феррит

Рисунок 7 – Коаксиальные ФВ на эффекте поперечного резонанса

В конструкции коаксиального ФВ (рисунок 7, б) вместо ферритовой пластины использованы два ферритовых стержня.

Для коаксиальных ФВ $C_{пр} = 1 \dots 1,5$ дБ, $C_{обр} = 15 \dots 20$ дБ.

Ферритовый вентиль на эффекте Фарадея

На рисунке 8 схематически изображен вентиль, использующий эффект Фарадея – поворот плоскости поляризации линейно поляризованной волны в круглом волноводе. На входе вентилья расположена ножевидная поглощающая пластина, подобная поглотителям в ослабителях низкого уровня мощности.

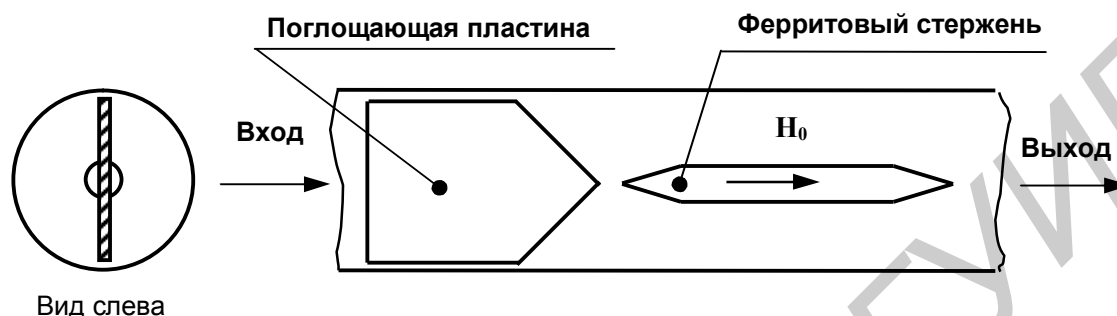


Рисунок 8 – Конструкция вентиля на эффекте Фарадея

Тогда, если в волноводе возбуждена волна типа H_{11} с поляризацией, показанной на рисунке 9, а, поглощающая пластина не создает потерь для волны, поступающей со стороны входа. В результате существования эффекта Фарадея плоскость поляризации этой волны на выходе ферритового стержня поворачивается на угол θ . Длина ферритового стержня в данном случае подбирается такой, чтобы угол θ составлял $\pi/4$ (рисунок 9, б). Аналогично плоскость поляризации волны, отраженной от нагрузки, поворачивается в ту же сторону еще на $\pi/4$. В результате электрическое поле отраженной волны оказывается в плоскости поглощающей пластины, как показано на рисунке 9, в. Отраженная волна практически полностью поглощается в пластине и не проходит на вход вентиля.

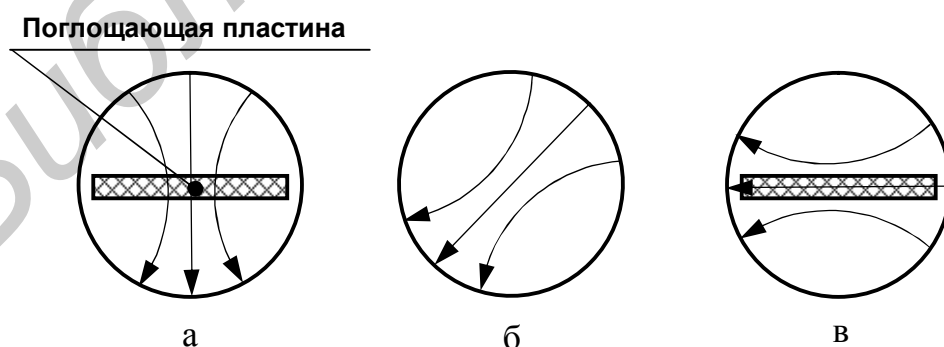


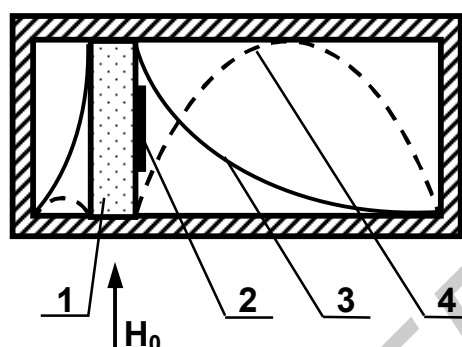
Рисунок 9 – Принцип действия вентиля на эффекте Фарадея

Для удобства подключения в обычные волноводные тракты на обоих концах описанного вентиля обычно располагают переходы с прямоугольного на

круглый волновод, а также секцию скрученного волновода прямоугольного сечения.

Ферритовый вентиль на явлении смещения поля

На рисунке 10 показан эскиз вентиля, основанного на явлении смещения поля. На этом же рисунке изображено распределение амплитуды напряженности электрического поля прямой и обратной вдоль широкой стенки волновода.



1 – ферритовая пластина; 2 – поглощающий слой; 3 – распределение поля обратной волны; 4 – распределение поля прямой волны

Рисунок 10 – Вентиль на явлении смещения поля

Напряженность внешнего магнитного поля H_0 выбирается так, чтобы выполнялось неравенство $\mu^+ < 0$. Как видно из рисунка, на главную грань ферритовой пластины нанесен поглощающий слой из графита.

Поскольку при отрицательных значениях магнитной проницаемости μ^+ волна с поляризацией H^+ вытесняется из феррита и распространяется вне его, то напряженность электрического поля волны с поляризацией H^+ в поглощающем слое будет весьма мала. Поэтому затухание энергии этой волны в вентиле незначительно. В то же время энергия волны с поляризацией H^- концентрируется в феррите, как в диэлектрике с высокой диэлектрической проницаемостью. Напряженность электрического поля этой волны у поверхности феррита велика, в поглощающем слое наводится ток проводимости и волна с поляризацией H^- интенсивно поглощается в слое графита.

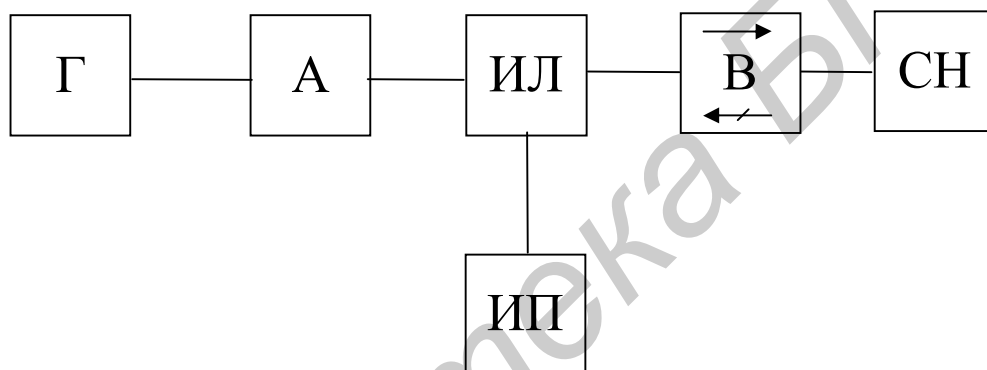
Вес и габариты вентиля определяются в значительной степени весом и габаритами постоянного магнита, который создает намагничивающее поле. Поскольку намагничивающее поле в вентиле, основанном на эффекте смещения поля, меньше резонансного, то вентиль, основанный на явлении смещения поля, меньше по весу и более компактен, чем аналогичный резонансный вентиль. Однако такой вентиль способен работать только с небольшими мощностями обратной волны.

3 Измерение параметров ферритовых вентилялей

Основными параметрами ферритовых вентилялей, измеряемыми в данной работе, являются коэффициент стоячей волны K_v при наличии согласованной нагрузки на выходе, прямые потери $C_{пр}$ и обратное затухание $C_{обр}$. Эти параметры в общем случае могут быть определены обычными методами измерения КСВ, затухания и коэффициентов передачи. Так, например, для измерения $C_{пр}$ и $C_{обр}$ наиболее широкое применение нашли метод замещения и метод непосредственного измерения мощности на выходе соответствующих плеч ферритового вентиля.

В данной работе численные значения K_v , $C_{пр}$ и $C_{обр}$ в рабочем диапазоне частот ФВ измеряются на дискретных частотах, т.е. зависимости $K_v(f)$, $C_{пр}(f)$ и $C_{обр}(f)$ строятся по точкам.

1 Измерение K_v производится по структурной схеме, представленной на рисунке 11.



Г – генератор СВЧ; А – прецизионный переменный аттенюатор;
ИЛ – измерительная линия; ФВ – ферритовый вентиль;
СН – согласованная нагрузка; ИП – индикаторный прибор

Рисунок 11 - Структурная схема измерения K_v

Настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Регулируя ослабление аттенюатора, подать СВЧ колебания в тракт и произвести настройку измерительной линии. Перемещая измерительную головку линии и варьируя ослабление аттенюатора, добиться значения тока детектора измерительной линии в максимуме поля в последней трети шкалы индикаторного прибора и зафиксировать величину максимума I_{max} в относительных единицах. Затем, перемещая измерительную головку вдоль измерительной линии, найти минимальное значение тока ее детектора и зафиксировать по индикаторному прибору величину I_{min} .

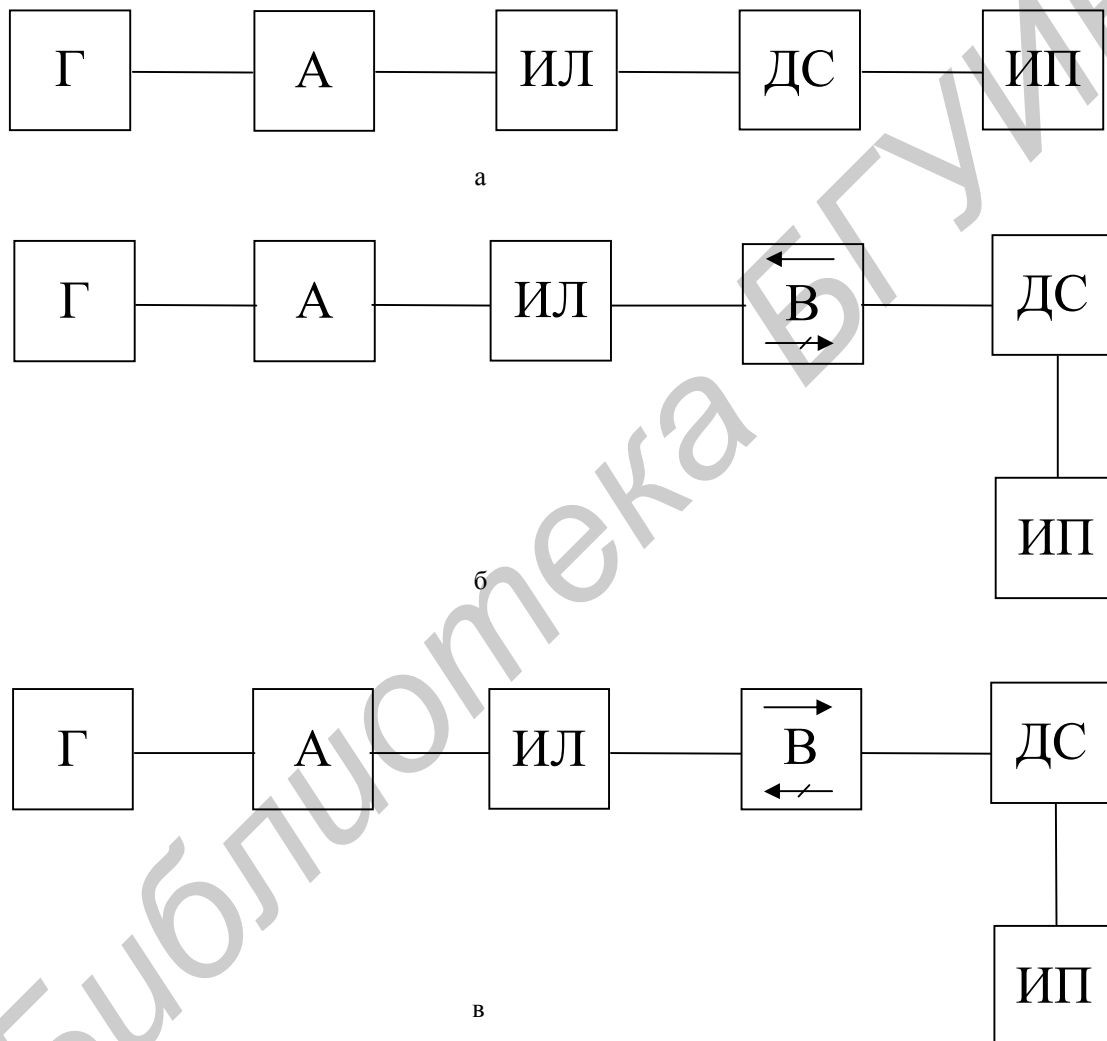
Учитывая квадратичность характеристики детектора измерительной линии, получим:

$$K = \sqrt{I_{\max}/I_{\min}} \quad (5)$$

Тогда $K_B = |K - K_{\text{сн}}| + 1,$ (6)

где $K_{\text{сн}}$ - коэффициент стоячей волны согласованной нагрузки.

Численные значения $K_{\text{сн}}$ на каждой частоте рабочего диапазона определяются методом прямых измерений по рассмотренной выше методике, когда вентиль исключен из тракта.



Г - генератор СВЧ; А - прецизионный переменный аттенюатор;
 ФВ – ферритовый вентиль; СН - согласованная нагрузка;
 ДС - детекторная секция; ИП - индикаторный прибор

Рисунок 12 – Структурная схема измерения прямых потерь и обратного затухания ферритового вентиля

2 Измерение $C_{\text{пр}}$ и $C_{\text{обр}}$ производится методом замещения с помощью эталонного (прецизионного) переменного аттенюатора по структурной схеме, представленной на рисунке 12.

Методика измерения

1 Собрать схему, приведенную на рисунке 12, а. Настроить генератор на заданную частоту, обеспечив максимальную мощность на его выходе. Подать СВЧ мощность в тракт и, регулируя ослабление аттенюатора, произвести настройку детекторной секции с согласованным входом.

Добиться, чтобы показания индикаторного прибора были при этом в последней трети его наиболее чувствительной шкалы. Отметить уровень выходного сигнала по индикаторному прибору и начальное ослабление A_0 , вносимое аттенюатором.

2 Собрать схему, приведенную на рисунке 12, б, и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_1 , вносимое аттенюатором.

Прямые потери определяются как разность показаний

$$C_{\text{пр}} = A_0 - A_1[\text{дБ}]. \quad (7)$$

3 Собрать схему, приведенную на рисунке 12, в, и, уменьшая ослабление аттенюатора, добиться первоначальных показаний индикатора. Отметить ослабление A_2 , вносимое аттенюатором.

Обратное затухание определяется как разность показаний аттенюатора:

$$C_{\text{обр}} = A_0 - A_2[\text{дБ}]. \quad (8)$$

В том случае, если при измерении обратного затухания $C_{\text{обр}}$ не удастся получить первоначальных показаний индикатора, следует повторить измерения (пп. 1-3) при меньших значениях показаний шкалы индикаторного прибора.

4 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с аппаратурой, относящейся к данной работе.

2 Измерить значения K_v , $C_{\text{пр}}$ и $C_{\text{обр}}$ в указанном преподавателем частотном диапазоне. Результаты измерений свести в таблицу (см. ниже).

3 Произвести расчеты и оформить отчет.

Измеряемый параметр	Частота				
I_{\max}					
I_{\min}					
K_B					
A_0					
A_1					
A_2					
$C_{\text{пр}}$					
$C_{\text{обр}}$					

5 Содержание отчета

- 1 Краткая формулировка цели работы.
- 2 Структурные схемы измерений.
- 3 Таблицы экспериментальных данных.
- 4 Результаты расчета и графики зависимостей $K_B(f)$, $C_{\text{пр}}(f)$ и $C_{\text{обр}}(f)$ волноводного ферритового вентиля.
- 5 Краткие выводы.

6 Контрольные вопросы

- 1 Какими параметрами характеризуется качество ФВ?
- 2 Что представляют собой ферриты и какими свойствами они обладают?
- 3 Что такое прецессия?
- 4 От чего зависит частота и направление свободной прецессии?
- 5 Как возникает вынужденная прецессия?
- 6 Что такое ферромагнитный резонанс?
- 7 Почему отсутствует явление ферромагнитного резонанса у обратной волны?
- 8 Что такое ФВ?
- 9 Где имеет место круговая поляризация магнитного поля волны H_{10} в прямоугольном волноводе?
- 10 Как изменяется положение сечения с круговой поляризацией магнитного поля волны H_{10} относительно узкой стенки прямоугольного волновода с изменением частоты?
- 11 Объясните принцип работы резонансного ФВ на базе волновода прямоугольного сечения и коаксиального ФВ.
- 12 Почему введение диэлектрической пластинки делает вентиль широкополосным? Какие другие методы расширения частотного диапазона ФВ вам известны?

13 Объясните методику измерения основных параметров ФВ, нарисуйте структурные схемы измерений.

14 Назовите области применения ферритовых вентилях СВЧ.

Литература

1 Аверьянов В.Я. Антенны и устройства СВЧ. Разд. 2: Учеб. пособие. – Мн.: МРТИ, 1982. – 90 с.

2 Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высш. шк., 1970. Т.1. - 440 с.

3 Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971. - 487 с.

4 Фальковский О.И. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1976. – 432 с.

5 Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1960. – 464 с.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Исследование ферритовых вентиляей

Методические указания к лабораторной работе №3
по дисциплине АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ
для студентов специальности 39 01 01 «Радиотехника»
всех форм обучения

Составители:

Кижлай Игорь Николаевич,
Кухарев Александр Васильевич,
Чмырев Николай Алексеевич,
Юрцев Олег Анатольевич

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать 16.02.2005.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 0,6.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 200 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,4.
Заказ 256.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6