



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени Н.Э. БАУМАНА

# Учебное пособие

**Учебно-методический комплект**

по дисциплине

**Проектирование СВЧ устройств**

**Конспект лекций**

МГТУ имени Н.Э. Баумана

<b>СВЧ ДИАПАЗОН .....</b>	<b>5</b>
Области использования: .....	5
Особенности СВЧ диапазона: .....	5
<b>РЕЗОНАТОРЫ СВЧ.....</b>	<b>10</b>
<b>ВОЛНОВОДЫ .....</b>	<b>11</b>
Поверхностные токи СВЧ в стенках волновода .....	14
Волновод с круглой формой поперечного сечения. ....	15
<b>ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ И КАЧЕСТВУ ОБРАБОТКИ ТОКОНЕСУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ.....</b>	<b>16</b>
<b>ШЕРОХОВАТОСТЬ: .....</b>	<b>16</b>
<b>КОНСТРУКЦИИ ВОЛНОВОДОВ И УЗЛОВ СВЧ.....</b>	<b>17</b>
Методы калибровки каналов волновода:.....	17
Полирование токонесущей поверхности волновода. ....	18
Магнитно-импульсная.....	18
Полировка электрическая .....	19
Обработка сложных волноводных узлов.....	19
Свободными стальными шариками .....	19
Механическая доводка. ....	19
Прокачка и дополнительные электроды.....	19
Химическое полирование: .....	20
Требования к волноводным изгибам: .....	20
Угловые изгибы: .....	20
<b> ГИБКА ВОЛНОВОДОВ. ....</b>	<b>20</b>
Гибка с использованием шарнирных оправок: .....	20
Гибка с использованием калибровочных оправок .....	21
Способы гибки волноводов без заполнения.....	22
Способ насечки. ....	22
Гибка круглых волноводов: .....	22
Заполнение шариками с последующей калибровкой.....	22
Гибка круглых волноводов без заполнения. ....	23
Изготовление угловых изгибов. ....	23
Технология изготовления скрученных волноводов: .....	25
В ДМ диапазоне. ....	25

В СМ диапазоне. ....	25
В ММ диапазоне. ....	25
<b>ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГИБКИХ ВОЛНОВОДОВ. ....</b>	<b>26</b>
Изготовление гибкой волноводной трубы. ....	26
Труба в виде гофры. ....	26
Гофрирование с помощью эластичного пуансона.....	28
Этапы сборки гофрированного волновода .....	29
<b>МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ И УЗЛОВ СВЧ УСТРОЙСТВ.....</b>	<b>29</b>
Холодное выдавливание. ....	30
<b>ГАЛЬВАНОПЛАСТИКА: .....</b>	<b>31</b>
Комбинированные методы изготовления волноводных узлов с помощью гальванопластики. .....	32
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУФАБРИКАТОВ.....</b>	<b>33</b>
Кольцевой делитель. ....	33
Соединители: .....	33
Требования к соединителям: .....	33
Фланцы.....	33
Общие требования: .....	33
Дроссельное соединение: .....	35
Создание плоских волноводоводных фланцев: .....	36
Жидкая штамповка. ....	36
Горячая штамповка.....	36
<b>ЭТАПЫ СБОРКИ ВОЛНОВОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ:.....</b>	<b>36</b>
1. Подготовка волновода и фланца .....	36
2. Установка ориентации и фиксации фланца.....	37
3. Соединение (пайка, сварка, склейка).....	37
а. Пайка газовой горелкой с твердыми серебро содержащими припоями ПСр 25, ПСр 40. $t_{ПЛ} = 450$ °С. ....	37
б. Сварка.....	38
в. Литьевая сварка .....	38
г. Склеивание.....	39
4. Обработка плоскостей, формирование канавок, установочных и крепежных отверстий. 39	
Установочное отверстие .....	39
Крепежное отверстие .....	39

<b>ВОЛНОВОДНЫЕ НАГРУЗКИ. ....</b>	<b>40</b>
1. Поверхностные поглотители. ....	40
Регулируемый аттенюатор. ....	41
Объемные поглотители. ....	41
<b>ФЕРРИТЫ НА СВЧ .....</b>	<b>43</b>
Возьмем круглый волновод .....	44
Вентиль .....	45
<b>КОНСТРУКЦИИ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТОВ ФАРАДЕЯ. ....</b>	<b>48</b>
Способы управления фазовращателями фазированных антенных решеток .....	49
<b>ФАЗОВРАЩАТЕЛИ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ.....</b>	<b>50</b>
Мы измеряем КСВ .....	53
Фазовращатели на пиндерах. ....	53
Одноразрядный проходной шлейфный фазовращатель.....	54
<b>СПОСОБЫ УСТАНОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЛАТУ .....</b>	<b>56</b>
Конструирование и изготовление корпусов для гибридных интегральных микросхем СВЧ.....	56
Виды корпусов: .....	56
Чашечный корпус .....	57
Рамочный.....	57
Пенальный корпус. ....	57
<b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОРПУСА.....</b>	<b>58</b>
<b>МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ СВЧ.....</b>	<b>58</b>
Типы линий передач: .....	58
Компланарные линии .....	59
Связанные микрополосковые линии.....	59
Высокодобротная линия.....	60
Подложки для ГИС СВЧ .....	61
Выбор основания для ГИС .....	61
Технологические методы изготовления проводящих слоев.....	62
Проводники на подложках.....	62

Элементы микрополосковых узлов СВЧ.....	62
Резисторы .....	63
Конденсаторы.....	64
Индуктивность .....	64
Навесные элементы.....	65
Конструирование и изготовление корпусов для интегрированных схем СВЧ.....	65
По параметрам делятся на: .....	65
Основные требования к корпусам: .....	65
Типы корпусов: .....	66
Коробчатый .....	66
Рамочный.....	66
Пенальный.....	66
Пластинчатый .....	66
Технологический .....	66
Анализ и синтез СВЧ-устройств .....	67
Основные характеристики устройства: .....	67
Различаются 3 основных класса синтеза:.....	67

## СВЧ диапазон

Спектр: 300-1000 ГГц

В СВЧ диапазон частично входят:

Метровый		30-300МГц	10-1 м
Дециметровый	DM	300-3000МГц	1м – 10 см
сантиметровый		3000-30000МГц	10см – 10мм
Миллиметровый		30000-300000МГц	10мм – 1 мм
Субмиллиметровый		300000-3000000МГц	1мм – 1 мкм

Ограничение 300 мкм - инфракрасное излучение.

### Области использования:

- ТВ
- Радиосвязь
- Радиолокация
- Микроволновая печь

### Особенности СВЧ диапазона:

- 1) Геометрические размеры аппаратуры соизмеримы с длиной рабочей волны (лямбда) и могут превышать ее, т.е. волны обладают квазиоптическими свойствами, источники имеют высокую когерентность, и можно получить высоконаправленное излучение.
  - a. Радиолокация
  - b. Закрытые системы связи
- 2) Волны хорошо проникают через атмосферу, есть ионизированные слои, поэтому проникновение избирательно.
- 3) Величина кванта энергии  $e = h\nu$  соизмерим с разностью близкорасположенных энергетических уровней, некоторых атомов и молекул, поэтому сантиметровой и мм диапазон используется в:
  - a. Спектроскопии
  - b. На основе спектрального излучения газов и твердых тел строятся квантовомеханические генераторы и усилители: мазеры
- 4) Использование СВЧ позволяет обеспечить большее число каналов передачи информации, особенно мм диапазон волн.
- 5) Период СВЧ колебания сравним со временем пролета электрона между электродами вакуумной лампы:
  - a. Клистроны
  - b. МагнетроныДействие основано на использовании инерции электронов
- 6) СВЧ диапазон вредно влияет на клетки организма.

Электрическое и магнитное поле:

$$\vec{E} \begin{bmatrix} B \\ M \end{bmatrix} \quad \vec{H} \begin{bmatrix} A \\ M \end{bmatrix}$$

Среда описывается двумя параметрами:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$
$$\varepsilon_r = \varepsilon_1 + j \tan \delta$$

Обе величины могут быть скалярными и тензорными (матрица – линейный оператор, преобразующий один элемент в другой).

$$|\bar{M}| = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{vmatrix}$$

$$\bar{B} = |M| \cdot \bar{H}$$

$$\bar{D} = |\varepsilon| \cdot \bar{H}$$

Плазма проявляет те же свойства.

Уравнения максвелла связывают взаимодействие Н и В, и В и D.

Характеристическое сопротивление:

$$Z = \frac{E}{H}$$

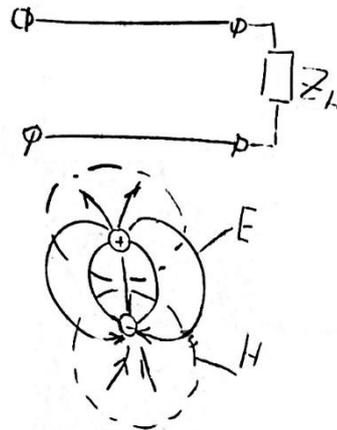
$$\bar{P} = [\bar{E} \times \bar{H}]$$

Простейшим случаем распространения – плоская волна – только ЕН.

Линии передачи на СВЧ:

При переходе к СВЧ диапазону при уменьшении длины волны, возникает ряд интересных явлений при передаче энергии. На их основе – линии передачи.

1) Двухпроводная, структура поля:

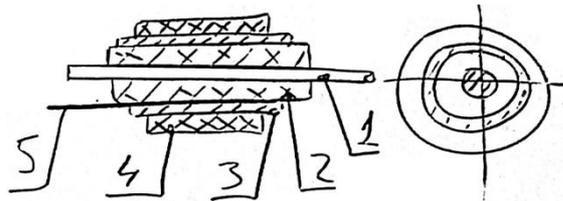


Используется в метровом диапазоне, ее достоинство – простая, недостаток - для нормальной работы линии треб соблюдение расстояния, и является открытой.

2) Коаксиальный кабель:

3) Через него нельзя пропустить высокую мощность

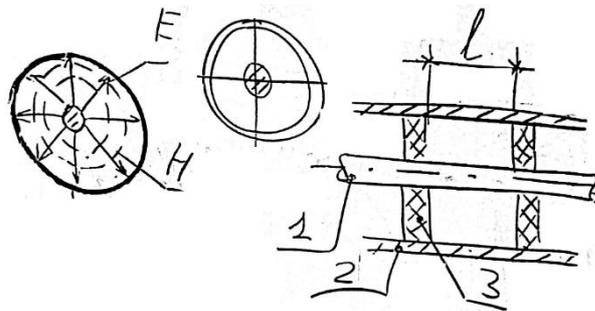
1. Центральная жила – стальная, покрытая слоем меди, или медь.
2. Изоляционный слой диэлектрика – полиэтилен, фторопласт – недорогие, но стабильные электрические свойства, минимальные потери.
3. Оплетка – медная, стальная.
4. Защитный слой



Для уменьшения расходов меди прокладывают (5) – фольгу, для лучшего экранирования, увеличить ячейки.

Каждый кабель имеет свое сопротивление, в ТВ используется 75 Ом.

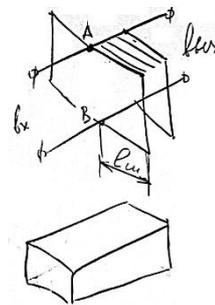
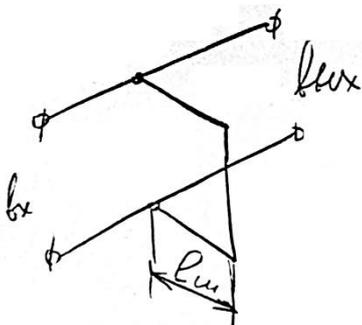
Коаксиальный волновод:



Через него можно пропустить высокую мощность, но сложно в изготовлении. Он не подвержен внешним воздействиям, не имеет внешних излучений.

Недостатки:

1. Необходимо поддерживать расстояние между проводниками, наличие диэлектрика и шайб вызывают дополнительные потери, появляются отраженные волны. КСВН – идеального 1, плохого – бесконечность.
2. С ростом частоты возрастают погодные потери в металле и диэлектрике.
3. Двухпроводная линия является излучающей, используется до ДЦ диапазона.
4. При появлении отраженных волн (высшего типа), увеличивается КСВН и увеличивается вероятность пробоя
5. Увеличение размеров коаксиальных линий резко увеличивают сложность изготовления.



Из теории длинных линий известно:

$$\theta = \frac{2\pi l}{\lambda}; \quad Z_{BX} = Z_l \frac{Z_H + jZ_l \tan\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}{Z_B + jZ_H \tan\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}, \text{ где } Z_{BX} = j \tan \theta Z_l, \quad l = \frac{\lambda}{4}, \quad \theta = \frac{\pi}{2}, \quad \tan \theta \sim \infty$$

Если мы возьмем короткое замыкание, то получим (не нашел):

Место для формулы., где

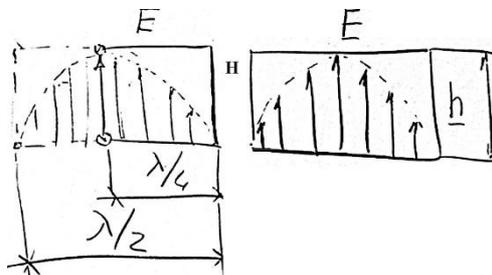
Место для формулы.

Место для формулы.

Подключение шлейфов не вносит изменений в структуру поля волноводной линии, и не вызывают потерь, но они образуют волноводы.

Интенсивность поля стремится к 0. В прямоугольном волноводе:

Это волна низшего типа



Достоинства волноводных линий передач:

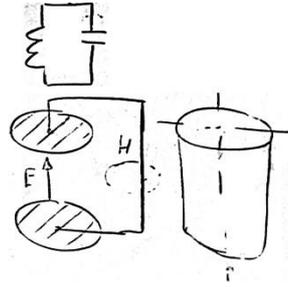
- 1) Простота конструкции, Жесткость, Продольная однородность
- 2) Нет излучения, все поле внутри, толщина стенок должна превышать в несколько раз глубину проникновения поля, т.е. скин слой.
- 3) Нет диэлектрических потерь
- 4) Потери в металле меньше, чем в коаксиале.
- 5) Высокая электрическая прочность

Недостаток – вес.

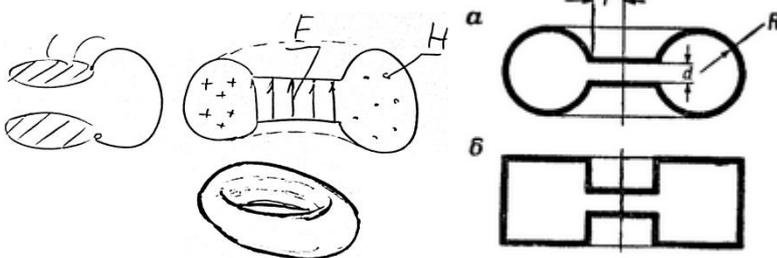
## РЕЗОНАТОРЫ СВЧ

Для генерирования СВЧ колебаний в качестве контуров применяются полые резонаторы различной формы.

Бывают цилиндрическими



Тороидальные резонаторы, а также резонаторы, занимающие промежуточное положение между тороидальными и цилиндрическими с укорачивающей емкостью, находят широкое применение в электровакуумных приборах сверхвысоких частот, главным образом в клистронах. Адронный коллайдер- тоже резонатор



Прямоугольные объемные резонаторы

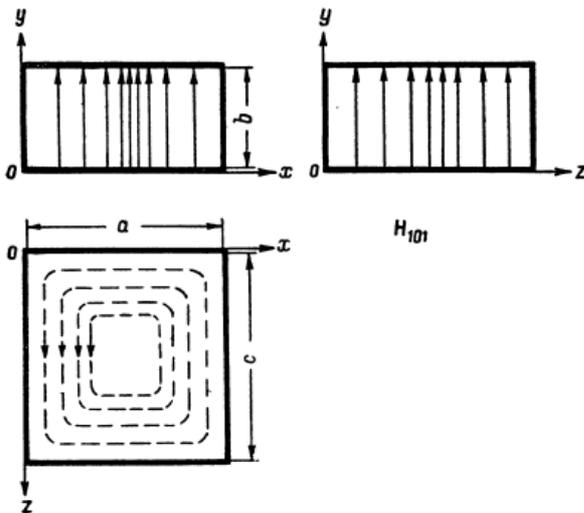
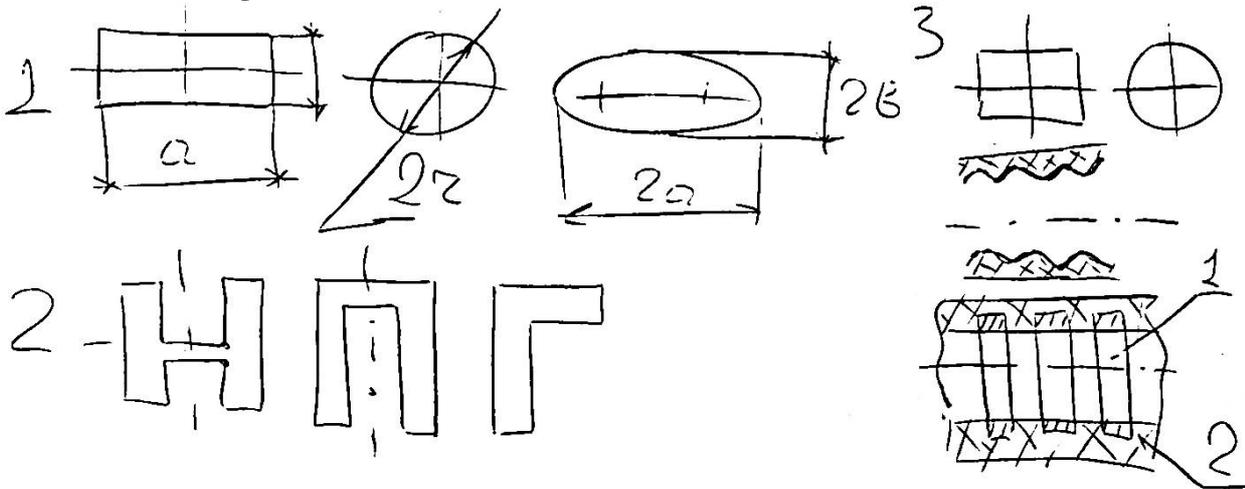


Рис. 249. Структура поля  $H_{101}$  в прямоугольном резонаторе

## ВОЛНОВОДЫ

Для передачи энергии СВЧ колебаний миллиметрового, сантиметрового и дециметрового диапазонов используются волноводные системы или волноводные тракты, которые сокращенно называются волноводами. Обычно волноводное звено состоит из отрезка трубы с соединенными фланцами на концах.



### 1) Прямоугольные, Круглые, Эллиптические

+	-
Достоинства: простота изготовления, жесткость, высокая электрическая прочность, малые потери, в 1,5-2 раза меньше, чем у коаксиального волновода.	Недостатки: масса, габариты.

### 2) Волноводы сложных форм поперечного сечения.

+	-
Наиболее часто используется. У «Н» большая широкополосность, чем у «Г», меньшие геометрические размеры	Сложность изготовления, высокая себестоимость, большие потери, низкая электрическая прочность.

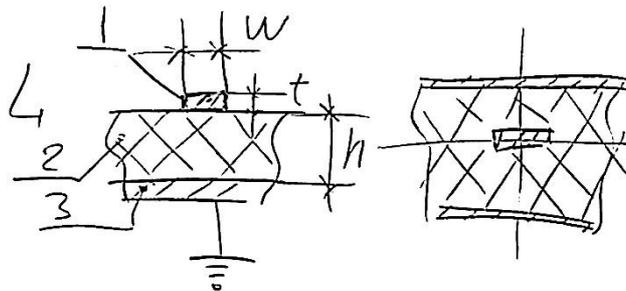
### 3) Гибкие – гофрированные, для Н11. Для волны Н01 – волновод из шайб (1) и опрессовки резиной (2). Покрывается резиной или пластиком.

+	-
Гибкие, позволяют соединять аппаратуру, которая перемещается в процессе эксплуатации.	Потери, сложны в изготовлении.

### 4) В СВЧ диапазоне для повышения миниатюризации устройств применяют микро полосковые линии.

Несимметричная микро полосковая линия	Симметричная микро полосковая линия
---------------------------------------	-------------------------------------

	Более экранирована
1) Микрополосок 2) Диэлектрическое основание – подложка 3) Заземленное основание	
Достоинства: Минимальные масса -габаритные параметры Широкополосность Высокая технологичность Недостатки: Низкие уровни мощности (если надо, то много полосков или волновод).	



5) Однопроводная линия.

Недостатки – свойства зависят от окружающей среды.

б) Диэлектрические волноводы.



Для миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов.

Достоинства: малые потери, высокая дальность.

Структура поля линии передачи.

Они описываются уравнением максвелла («Я их плохо помню, поэтому спишу с тетрадки» Лавров).

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \operatorname{grad} \bar{E} + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\operatorname{grad} \bar{H} - \mu \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \operatorname{div}(\varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}) = \rho \\ \operatorname{div}(\mu \mu_0 \vec{H}) = 0 \end{cases}$$

Поля вихревые и одно поле превращается в другое в процессе распространения.

Электрическое поле начинается и заканчивается на зарядах.

Магнитных зарядов не существует и поле H является вихревым.

Сигма – электрическая проводимость среды.

Решение системы уравнений максвелла с учетом граничных условий позволяют получить выражения для структуры поля и составляющих полей E и H, в каждой точке описываемого пространства.

Итого 6 неизвестных.

Для прямоугольных и круглых волноводов, решение получается в замкнутом виде.

Прямоугольный волновод:

Существуют 2 семейства волн:

$$\begin{aligned} \{H_{mn}\} & H_z H_x H_y E_x E_y \\ \{E_{mn}\} & E_z E_x E_y H_x H_y \\ & H_{10} H_{21} E_{11} \end{aligned}$$

m и n – числа, указывающие количество вариаций поля по оси x и y. Т.е. эти числа говорят о том, сколько раз пол меняет свое направление.

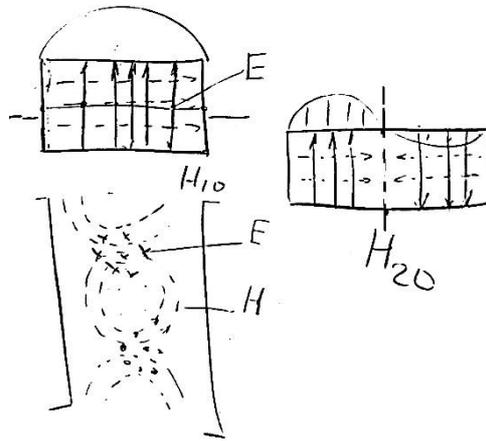
Из уравнения максвелла: Структура поля описывается синусами и косинусами.

$$E_y \sim \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)$$

$$H_x \sim \sin$$

$$H_z \sim j \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)$$

$j - H_z$  - отстает от  $H_x$  на  $\frac{\pi}{2}$



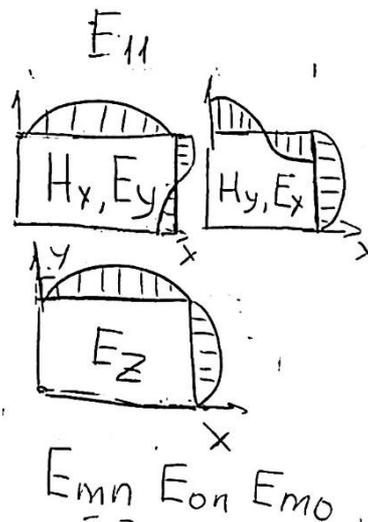
Лев: Введение плоскости – структура поля не изменится, но мощность разделится на 2 части.

Прав: Введение плоскости – получение волновода с противофазой  $\pi$ .

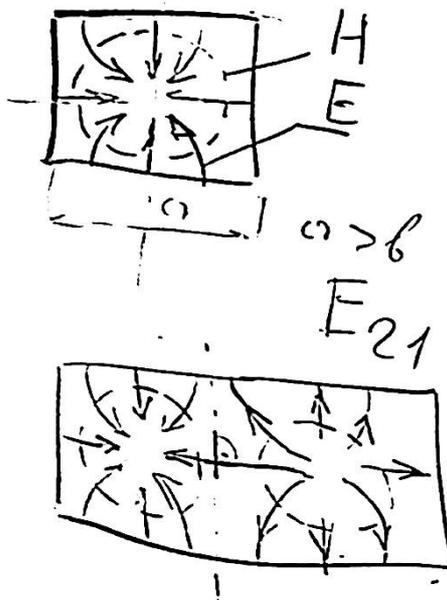
Семейство E волн.

Поле должно начинаться на металле или на зарядах.

Низшая волна  $E_{11}$



Структура поля с центральной симметрией, волна  $E_{21}$ :



Все силовые линии электрического поля перпендикулярны стенкам волновода.

Критические длины волн в волноводах.

Максимальная волна выбранного типа волн, при которой данный тип пожет распространяться в линии передачи называется критической. Т.е. если длина волны будет больше лямбда критической – волна не распространяется – условие отсечки.

Для прямоугольного волновода:

Рассмотрим волновод 23\*10. Найдем отсечку. 1 в кружочке – одно волновая жила (23-46). 5 – пяти волновая жила (еще E<sub>11</sub>).

23\*10

$$\lambda_p < \lambda_{кр}$$

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

18,3 20 23 2ab 46

$$\lambda_{кр H_{10}} = 2a$$

$$\lambda_{кр H_{20}} = a$$

$$\lambda_{кр E_{11} H_{11}} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\lambda_{кр H_{01}} = 2b$$

**Поверхностные токи СВЧ в стенках волновода**

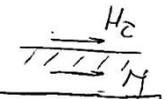
Условие возникновения магнитного поля – движущиеся заряды.

По внешней поверхности волновода протекают токи СВЧ, которые однозначно связаны со структурой поля волновода.

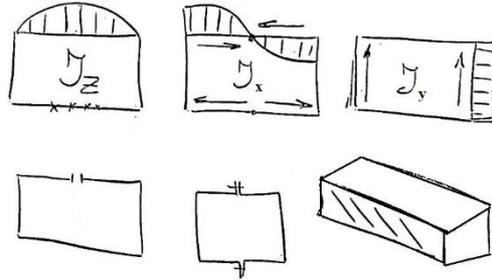
По закону полного тока поверхностная плотность тока численно равна магнитной напряженности поля, касательно рассматриваемой точки:

$$|j| = |H_{\tau}$$

При этом глубина проникновения(дельта) в металл равняется – глубина скин слоя, на которой уровень поля падает в e (экспонента) раз. Определяется частотой, магнитной проницаемостью стенки (сталь, железо меньше):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_{ст} \mu_0 \sigma}}$$


Эпюры:



Токов пересечения нет. Измерительная линия.

Прямоугольная щель в середине стенки волновода, т.к. она не прерывает линии поверхностных токов и может быть использована для изучения свойств поля внутри волновода.

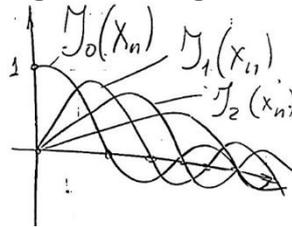
Если волновод разрезать специально – получается сканирующая антенная решетка.

### Волновод с круглой формой поперечного сечения.

Из решения уравнения максвелла было получено, что структура поля в круглом волноводе описывается по радиусу функции Бесселя, а по азимуту функциями синуса или косинуса.

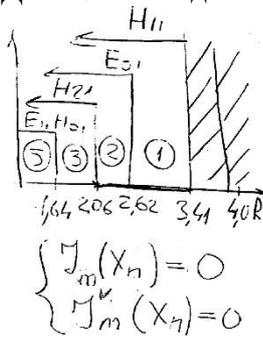
Функция Бесселя (нулевого порядка начинается с единицы) – ортогональные функции, по которым можно раскладывать по цилиндрической системе координат.

Пересечение этих функций с осью координат – корни.



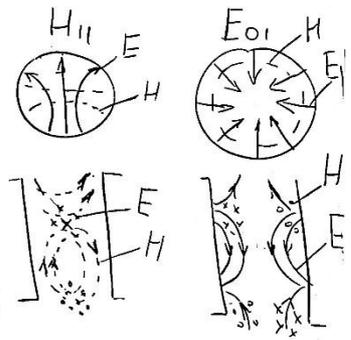
Критические длины волн определяются через корни функции Бесселя.

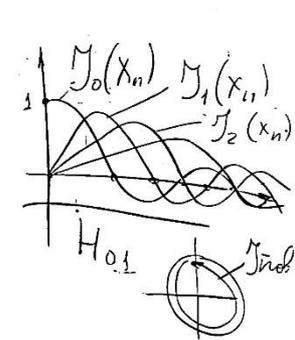
Для поля H и для поля E, получим:



$\lambda_{кР H_{11}} = 3,41R$   
 $\lambda_{кР E_{01}} = 2,62R$   
 $\lambda_{кР H_{21}} = 2,06R$   
 $\lambda_{кР E_{11} H_{01}} = 1,64R$

$J_m(x_n) = 0$   
 $J'_m(x_n) = 0$





У волны  $H_{01}$  электрические линии имеют замкнутый кольцевой характер, поэтому можно построить гибкий волновод.

Если в волноводе высшие типы могут распространяться, то это не значит, что они будут там распространяться. Для их появления необходимы условия возбуждения, т.е. поместить какую-то неоднородность.

$$\alpha = \sqrt{\pi f \mu_a \sigma}; \quad E_a = E \cdot e^{-\alpha z}; \quad \frac{E_0}{E_a} = \frac{E \cdot e^{-\alpha z}}{E \cdot e^{-\alpha(z+\delta)}} = e;$$

$$\alpha(z + \delta_c - z) = 1; \quad \delta_c = 1/\sqrt{\pi f \mu_a \sigma}; \quad R_{nob} = \sqrt{\pi f \mu / \sigma}$$

### Требования к материалам и качеству обработки токонесущей поверхности

#### 1. Материал

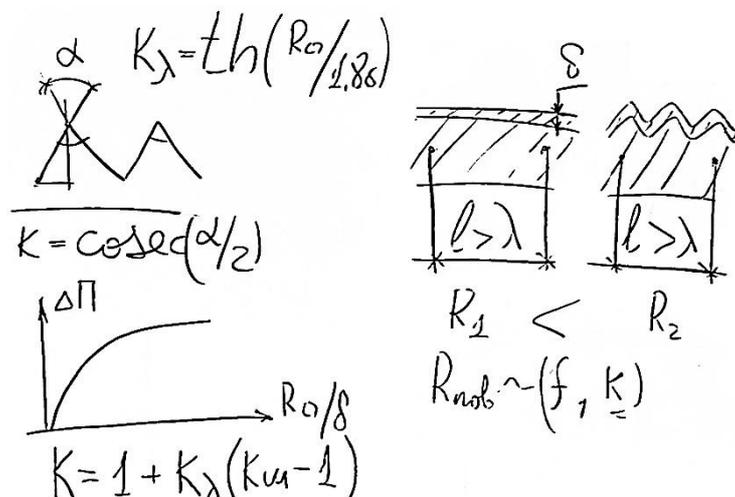
Требования к материалам, применяемым в производстве волноводов:

- 1) Высокая проводимость;
- 2) Материал должен допускать обработку по высокому классу чистоты;
- 3) Материал должен удовлетворять конструкторским и технологическим требованиям изделия.

Этим свойствам удовлетворяют:

Материал	Проводимость, См/м	Особенности	Применение
Латунь	$15,8 \cdot 10^6$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Дешевизна и высокая технологичность</li> <li>• Проводимость меньше, чем у меди</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Литье;</li> <li>2. Штамповка;</li> <li>3. Механическая обработка.</li> </ol>
Серебро	$62,5 \cdot 10^6$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Высокая электропроводность</li> <li>• Антикоррозионные свойства</li> </ul>	Чаще всего используется в защитных и проводящих покрытиях
Медь	$58,1 \cdot 10^6$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сильно окисляется</li> <li>• Высокая проводимость</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Изготовление волноводов <u>в мм диапазоне</u></li> <li>2. Изготовление отдельных узлов</li> </ol>
Золото	$45,5 \cdot 10^6$		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Защитное покрытие для контактов в низкой частоте</li> <li>2. Защитное покрытие для микрополосков в высокой частоте</li> </ol>
Алюминий	$37 \cdot 10^6$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Легкий,</li> <li>• дешевый,</li> <li>• коррозионностойкий</li> <li>• Хорошая проводимость</li> <li>•</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Литье;</li> <li>2. Штамповка;</li> <li>3. Механической обработке</li> <li>4. Используется в <u>СМ и ДМ диапазоне</u>.</li> <li>5. В сложных климатических условиях</li> </ol>

#### Шероховатость:



ДМ -6-8; СМ 10-12; ММ - 12-14

Оксидные пленки:

Толщин оксидных пленок измеряется в единицах микрона

Окислы имеют высокая  $R_{нов}$

Для уменьшения оксидных пленок:

- 1) Защитный слой: лакокрасочные
- 2) Эмаль
- 3) Защитные диэлектрические покрытия
- 4) Осаждение металлов с более высокой проводимостью

Толщина покрытий десятки микрон, при этом тангенс диэлектрических потерь должен быть существенно меньше, чем  $10^{-3}$

Гальваническое осаждение.

### **Конструкции волноводов и узлов СВЧ.**

Узел – это устройство, выполняющее одно и несколько (РЭС) функций, и имеющее законченное конструктивное и схемное исполнение.

СВЧ тракт – совокупность СВЧ устройств, соединенных вместе для выполнения общей и единой задачи.

Общие требования к конструкции узла:

- Максимум положительных и минимум отрицательных достоинств
- Масса-габаритные параметры
- Максимальная механическая прочность
- Макс электромагнитное экранирование
- Минимальная себестоимость
- Высокая технологичность

Для изготовления прямолинейных участков используются стандартные цельнотянутые механические трубы прямоугольного сечения, изготовленные из латуни и др.

Однако процесс перевозки и хранения приводит к ухудшению качеств.

Требования к точности формы поперечного сечения волновода: ДМ -5, СМ -3-4, ММ – 1. (подобрать квалитеты лямбда пополам)

### **Методы калибровки каналов волновода:**

- 1) Механическая и электромеханическая (магнитно-импульсная)
1. Заготовка
2. Калибрующая оправка – закаленная легированная сталь, на 3-2 класса выше, чем требуемая поверхности волновода. Закаливается до «по Роквеллу», покрывается слоем смазки и прокатывается через 3 и 4 несколько раз, при этом происходит обжатие и раскатка металла с холодным истечением, при этом оси валков сближаются.
3. 4. – Валки, калибрующие валики

$$\alpha = \sqrt{\pi f M a \delta}$$

$$E_a = E \cdot e^{-\alpha z}$$

$$\frac{E_0}{E_a} = \frac{E \cdot e^{-\alpha z}}{E \cdot e^{-\alpha(z+\delta)}} = e^{\alpha \delta}$$

$$\alpha(z + \delta_c - z) = 1$$

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi f M a \delta}}$$

$$R_{\text{нод}} = \sqrt{\pi f M / \delta}$$

Получаем точность 3 класс, чистота поверхности 7 класс.

2) С круглыми волноводами:

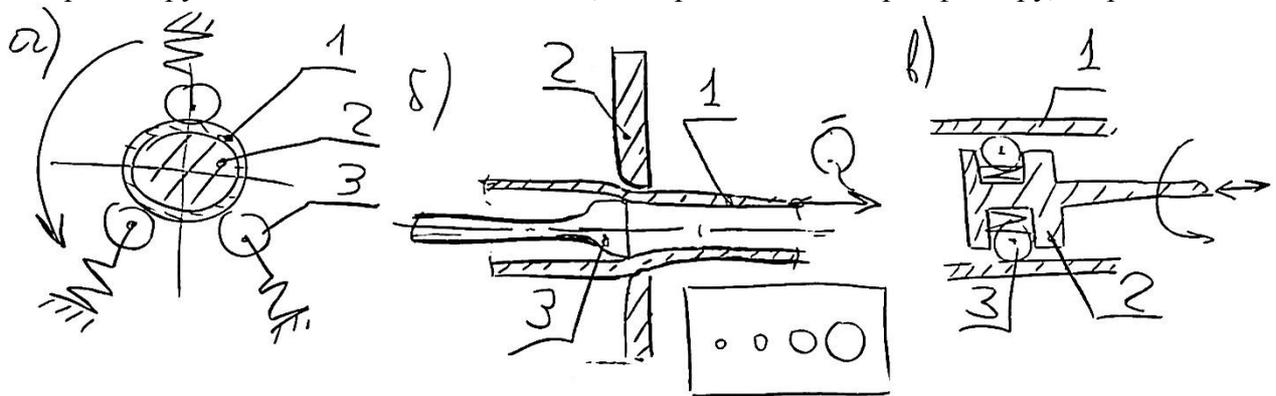
2 – оправка

3 – система подпружиненных роликов

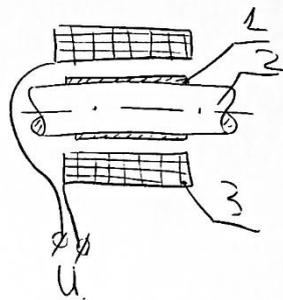
После всех операций калибровки, проводим отжиг

### Полирование токонесущей поверхности волновода.

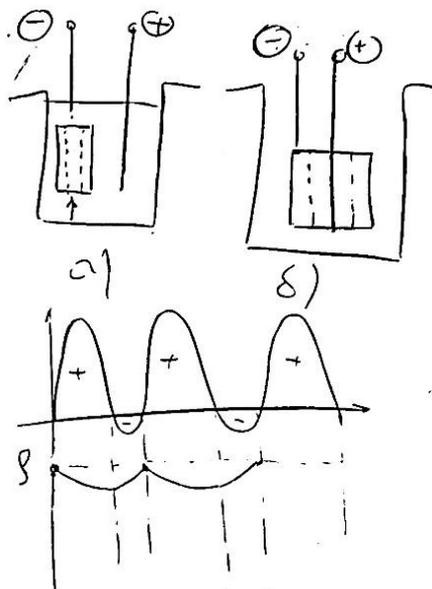
Калибровка круглого волновода: а – обкатка, б – протягивание через фильеру, в - раскатка



Магнитно-импульсная



## Полировка электрическая



### Обработка сложных волноводных узлов.

*Свободными стальными шариками*

- 1) Заготовка
- 2) Фланец
- 3) Стальные шарики, диаметром 1 мм (50-60% объема)

15 мин с частотой 30-40 Гц и амплитудой вибрации 2-3 мм обрабатывается одна стенка и одно положение.

Достоинства – обрабатываются сложные углы, нет загрязнения.

Недостатки – возникает наклеп, необходим отжиг.

*Механическая доводка.*

Недостатки механической обработки:

- 1) Загрязнение поверхности
- 2) Для тонкостенных изделий нельзя применять метод вибрации.

Для избегания этого предлагается электрохимическое полирование:

Удаление избытка металла с поверхности под действием электрического тока в электролите.

Разложение металла идет на острых кромках, там, где максимальная концентрация  $E$  поля.

*Прокачка и дополнительные электроды*

Для повышения качества и интенсивности работы применяется прокачка и дополнительные электроды (катоды внутри волновода).

Достоинства:

1. Отсутствие мех воздействий
2. Отсутствие загрязненного поверхностного слоя
3. высокая производительность

Недостаток:

1. Чистота обработки ниже 10 класса точности.
2. Все зависит свойств электролита:
  - a. Температуры
  - b. Однородность
  - c. Концентрации
  - d. Состава
  - e. Времени обработки

f. Требуется источник тока

*Химическое полирование:*

Химическое полирование – химическое воздействие травителей на поверхность заготовки.

- Кислоты

Достоинства – обрабатываемые самые сложные узлы, позволяет удалить дефектный слой после механической полировки, более экономичен

Недостаток – маленькая скорость, из-за продуктов распада.

Медь и латунь – соляной кислотой, алюминий – NaOH

*Требования к волноводным изгибам:*

- 1) Минимальный радиус гибки
- 2) Плавность и сохранение формы поперечного сечения в зоне гибки.
- 3) Минимальный коэффициент отражения

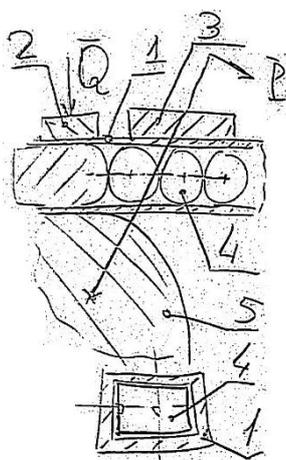
*Угловые изгибы:*

- 1) Одноступенчатый
- 2) Двухступенчатый

### **Гибка волноводов.**

#### **Гибка с использованием шарнирных оправок:**

Специальная оправка – цепь из цилиндрически роликов, соединённая между собой и подвижная.



1. Заготовка
2. Неподвижный прижим
3. Подвижный прижим
4. Цепь – шарнирная оправка
5. Шаблон

Достоинства:

- Чистота поверхности 11 класс
- Высокая точность изгиба
- Операция занимает меньше времени.

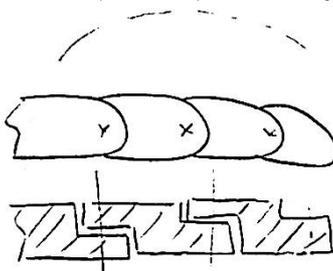
Недостатки:

- Сложность изготовления самой оправки
- Трудно изготовить изгибы с малым радиусом

- Сложность извлечения оправки - берем винтовое приспособление и выдавливаем оправку.

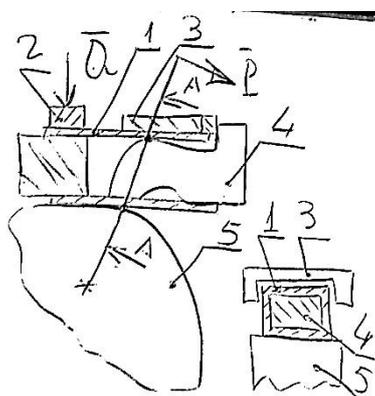
Используется в основном в СМ диапазоне.

В коротковолновой части СМ диапазона (20 ГГц) используется несколько другая оправка:



### Гибка с использованием калибровочных оправок.

Для ММ диапазона.



1. Заготовка
2. Неподвижный прижим
3. Подвижный прижим
4. Калибрующая оправка
5. Шаблон

В каждый момент гибки заготовка находится между 2,3,4. Зона перемещения деформации постоянно находится между 3,4,5.

Достоинства:

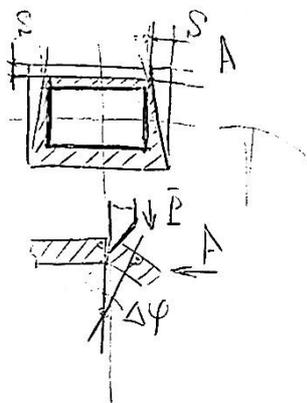
- Чистота поверхности 10-12 класс
- Высокая точность изгиба

Недостатки:

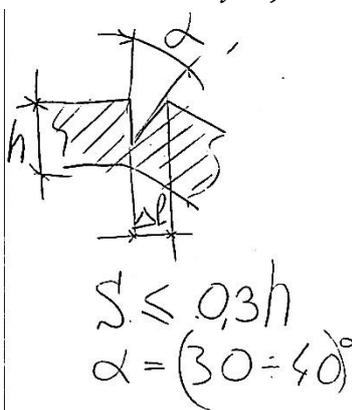
- Для каждого радиуса гибки нужен свой комплект шарниров и оправок.

## Способы гибки волноводов без заполнения.

Способ насечки.



Насечка происходит синхронным действием 3 ножей при пошаговой подаче заготовки. Угол заточки  $\alpha$  ( $30 - 40^\circ$  для латуни). Волновод удлиняется на  $\Delta l$ .



Достоинства:

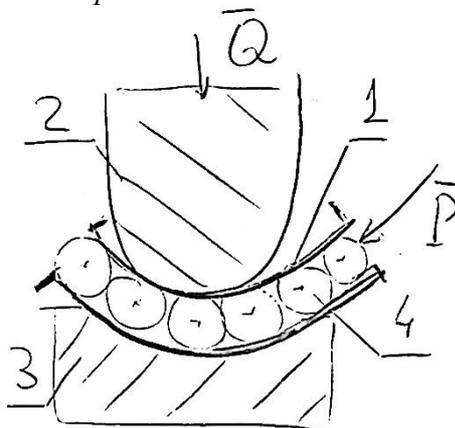
- Высокая производительность
- Широкая номенклатура

Недостатки:

- Увеличение шероховатости внешней поверхности
- Низкая точность

## Гибка круглых волноводов:

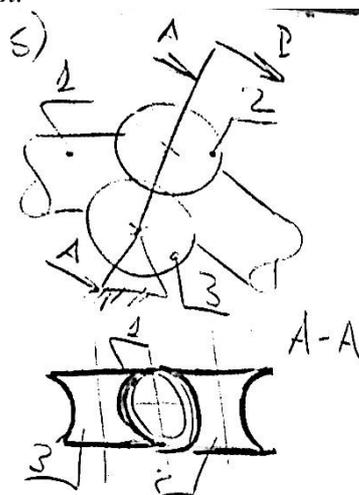
Заполнение шариками с последующей калибровкой



1. Волновод
2. 3. Матрица и пуансон
4. Стальные шарики (30-50), отличаются по диаметру на 0,01 мм, попадают в волновод от меньшего к большему под прессом.

Если использовать ролики, то калибруют прямоугольный волновод.

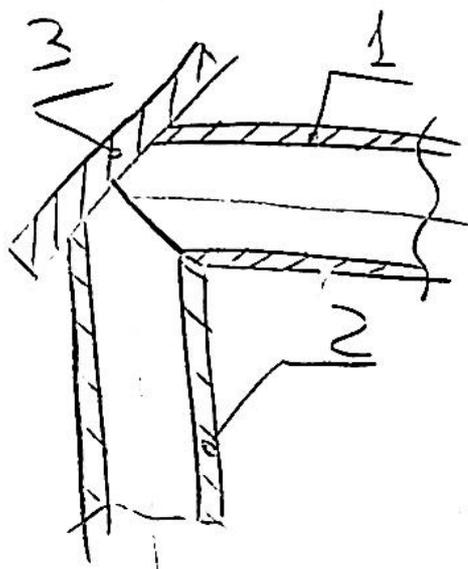
*Гибка круглых волноводов без заполнения.*



1. Волновод
2. Подвижный ролик
3. Неподвижный ролик

При малых радиусах гибки желательно проводить калибровку.

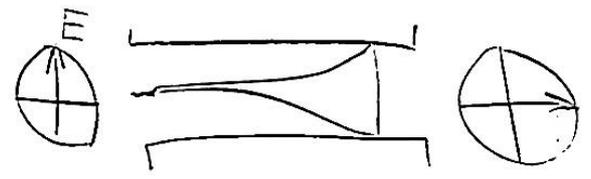
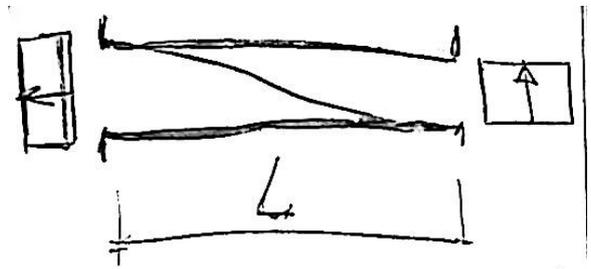
#### **Изготовление уголковых изгибов.**



- 1) Получение заготовок – 2 волновода(1,2) и отражающая пластина(3). Фрезерованием.
- 2) Ориентация и фиксация частей заготовок
- 3) Пайка или сварка места стыка (450 градусов с содержанием серебра)

Технология изготовления скрученных волноводов – для изменения направления плоскости поляризации.

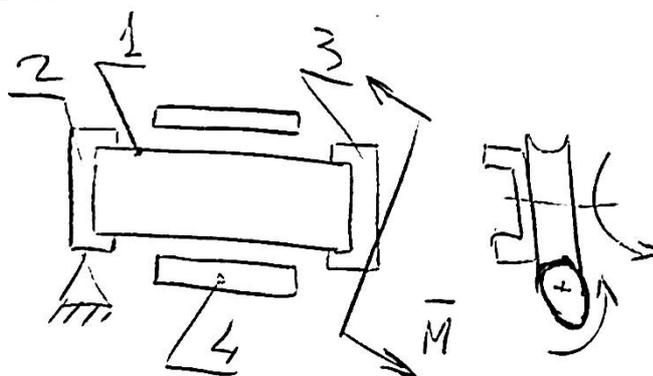
Удлинение для изменения направления плоскости поляризации на длине  $L=2-3$  лямбда, нужно для минимального КСВ.



### Технология изготовления скрученных волноводов:

В ДМ диапазоне.

Сечение порядка 72\*34

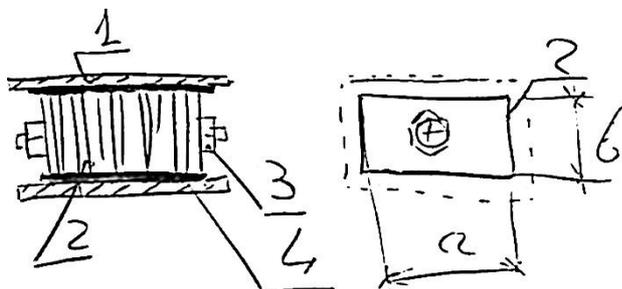


1. Волновод
2. Неподвижный зажим
3. Подвижный зажим
4. Нагревающее устройство

Волновод – заполняется кварцевым песком, уплотняется, нагревается 4 и скручивается, температура нагрева 300-400 °С.

Шероховатость поверхности уменьшается на 1-2 класса из-за песка и нагрева.

В СМ диапазоне.



1. Заготовка
2. Стальные пластины, стянутые 3
3. Шпилька

Для защиты поверхности устанавливаются прокладки из медной фольги (4).

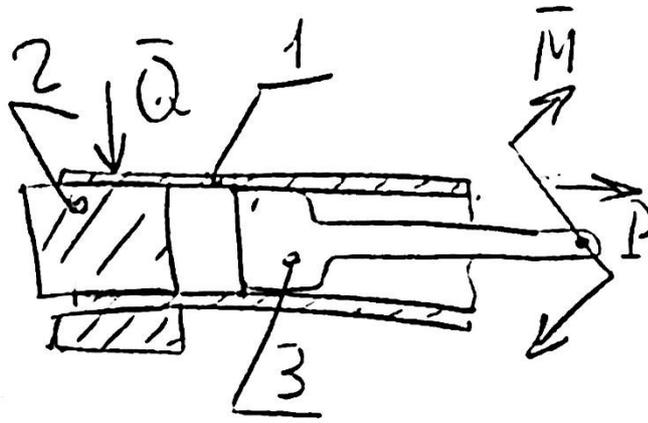
4. Медная фольга.

Выполняется операция поворота на 90 °

После выполнения операции шпилька ослабляется и стальные пластинки по одной спокойно извлекаются из волновода.

В ММ диапазоне.

Поворот с помощью калибрующей оправки.



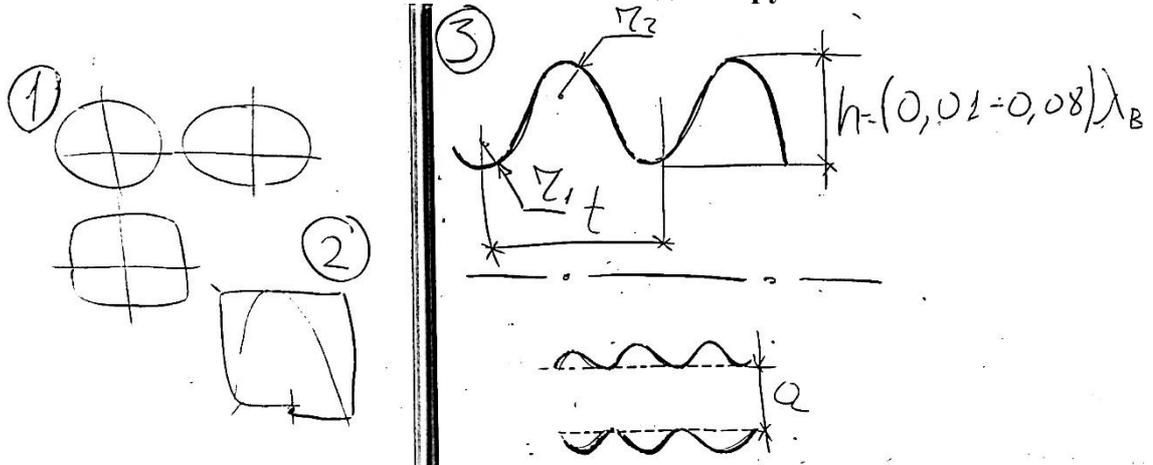
1. Заготовка
2. Зажим
3. Калибрующая оправка, которая последовательно совершая вращательное движение, выдвигается из волновода.

В 3-5 ММ диапазоне используются оправки из фторопласта.

#### Изготовление гибких волноводов.

Гибкие волноводы необходимы для соединения участков волноводного тракта со смещенными или перекрещивающимися осями, или имеющее относительное перемещение в процессе эксплуатации.

#### Изготовление гибкой волноводной трубы.



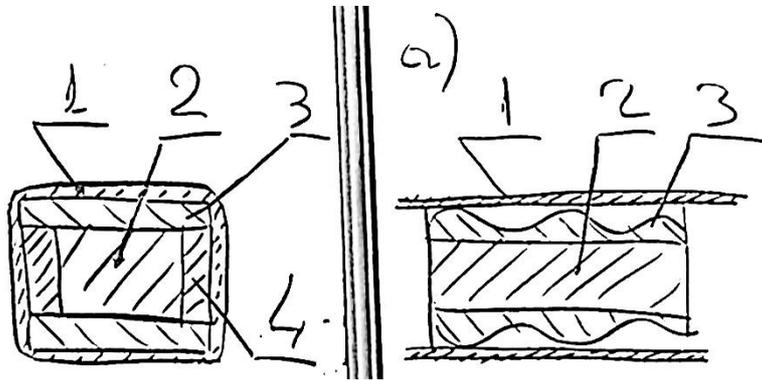
1. Для изготовления гибкой трубы берется заготовка, круглый тонкостенный волновод с толщиной 0,12-0,14 мм, и получаем эллипсовидный волновод, протягиванием через фильеру.
2. Сварачивание тонкого листа и сваривание в нижней точке, т.к. волна  $H_{10}$  в этой точке не проходит

*Труба в виде гофры.*

Для обеспечения упругих свойств необходимо, чтобы  $r_2$  был  $>$ , чем  $r_1$ .

#### Гофрирование жестким пуансоном по жесткой матрице

1. Гофрирование по зубчатой рейке

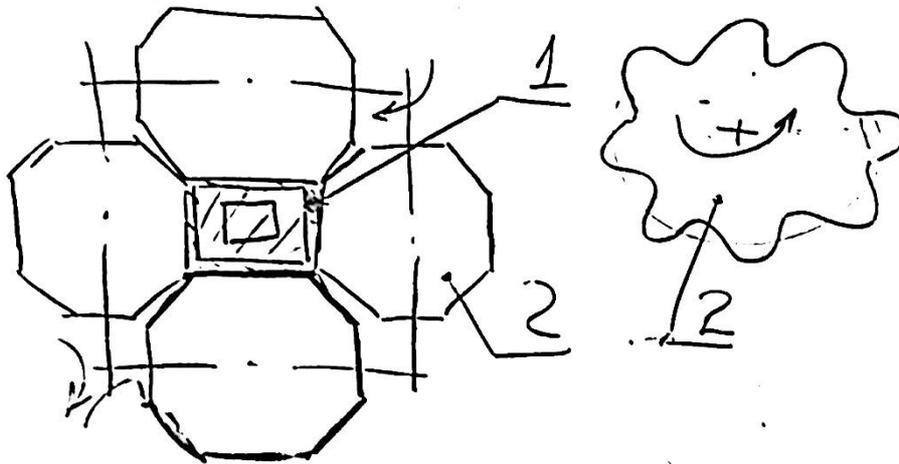


1. Заготовка
2. Центральный вкладыш
3. 4. Зубчатые рейки

2 соединяется с 3 и 4, штифтуется и устанавливается в 1, после этого все это пропускается через зубчатую фильеру.

### Зубчатая фильера.

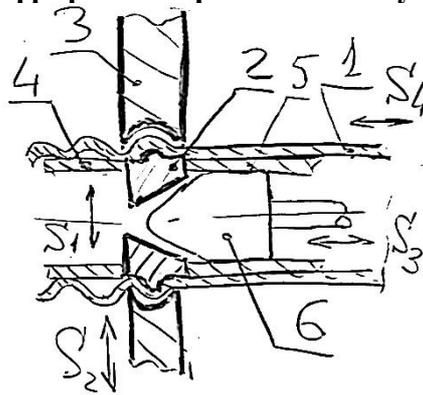
Это колесо с профилем, таким же, каким должен быть волновод:



1. Заготовка
2. Зубчатое колесо

Точность: 6-7 класс. Шероховатость получается меньше на 2 класса, чем был у заготовки.

### Гофрирование разжимным пуансоном

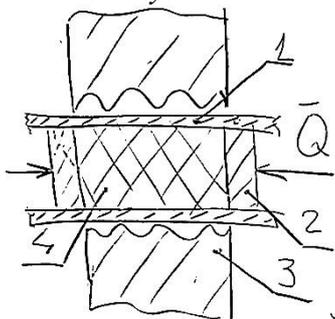


1. Заготовка, 2. Пуансон, 3. Матрица, 4. 5. Направляющая, 6. Клиновидный шток  
 Все части перемещения  $S_1, S_2, S_3, S_4$  синхронизированы, связаны механически.  
 Точность 5 класс. Чистота ухудшается на 1 класс.

## Гофрирование с обжатием

Практически не используется.

*Гофрирование с помощью эластичного пуансона*



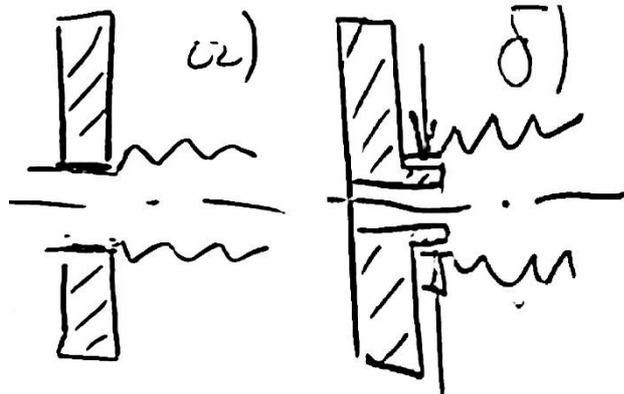
1. Заготовка
2. Плунжер
3. Поршень
4. Эластичный пуансон

Выбор способа изготовления определяется:

1. Точностными размерами
2. Качеством токонесущей поверхности
3. Механическими свойствами трубы
4. Производительность

### Этапы сборки гофрированного волновода

#### 1. Соединение с фланцем:



- а. пайка серебросодержащими припоями ПСР4520 (20-количество серебра в припое)  $T_{пл} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
  - б. Возможно применение контактной сварки, но для этого нужен специальный фланец.
2. Отжиг и осадка на оправке
  3. Опрессовка резиной
  4. Серебрение для повышения качества токонесущей поверхности.

#### Методы изготовления корпусов и узлов СВЧ устройств.

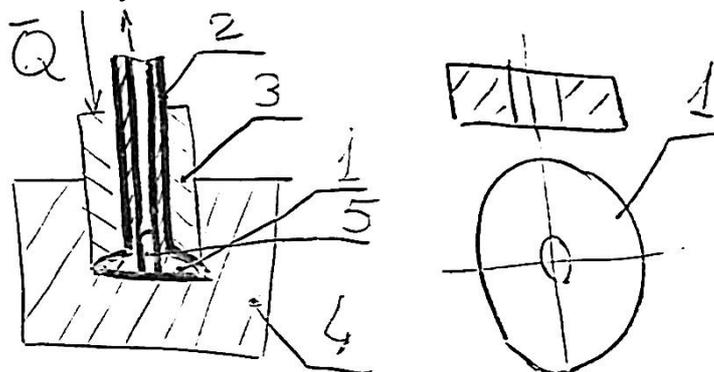
В серийном производстве для изготовления узлов применяется:

- Литье – применяется при изготовлении элементов СВЧ тракта со сложной конфигурацией или с изменяющимся сечением.
  - Под давлением
  - По выплавляемым моделям
- Холодное выдавливание
- Гальванопластика

Модель изготавливается из парафиностеариновых смесей, затем покрывается жидким стеклом, формируется оболочка, которая высушивается, парафин выплавляется, и оболочка подвергается отжигу. Для формирования полостей или отверстий детали применяются «знаки», которые потом удаляются при отливке. Наиболее используемый материал при изготовлении знаков – карбонит, гипс. Чтобы его удалить, заготовку кипятят в воде, стержень размягчается, его удаляют, затем снова кипятят и промывают в проточной воде. Последний этап – отжиг, для снятия внутренних напряжений.

### Холодное выдавливание.

Сущность метода холодного выдавливания заключается в воздействии на заготовку пуансоном, с усилием, при котором металл приобретает высокую пластичность, и затекает в зазоры между матрицей и пуансоном.



1. Заготовка – шайба с отверстием, 2. Готовое изделие, 3. Матрица, 4. Пуансон, 5. Направляющий вкладыш.

Отличается 2 приема изготовления холодного выдавливания – прямой и обратный.

Прямой – направление силы совпадает с направлением движения изделия.

Здесь метод обратного выдавливания.

Обычно используют обратное выдавливание, т.к. он позволяет получить изделие с меньшим диаметром поперечного сечения, с большей сложностью. При этом высокая точность - 5, которая определяется размером пуансона. 10 класс чистоты. Метод выгоден в серийном производстве, для 10 трубочек не будут изготавливать высокоточный пуансон.

Метод очень эффективен в ММ диапазоне. Материал – медь. Достаточно тонкостенные волноводы.

Для изготовления используют последовательность:

1. Необходимо определить форму заготовки
2. Расчет ее размеров, при этом заготовка должна иметь отверстие, соответствующее размеру волновода.
3. Определить степень деформации и силу  
Степень деформации ( $S$  – поперечное сечение).

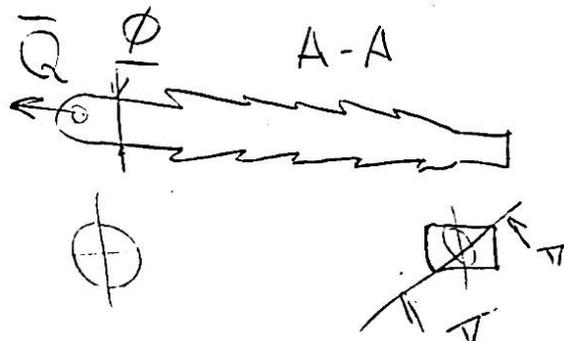
$$\varphi = \frac{S_3 - S_d}{S_3} \cdot 100\%$$

Рассчитав ее, сравнивают с допустимой. Алюминий  $\leq 96\%$ , латунь 70-90%, медь 60-80%.

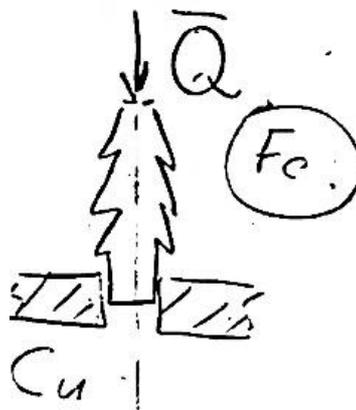
4. Заготовку вырубает из пластины соответствующей толщины
5. Формируют отверстие, соответствующее размеру волновода
6. Отжиг, соответствующий нейтральной среде
7. Покрытие твердой смазкой
8. Установка в станок
9. Выдавливание.

Инструмент для протягивания:

$$\varphi = \frac{S_3 - S_2}{S_3} \cdot 100\%$$



Инструмент для прошивки



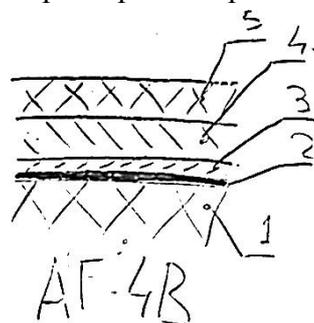
### Гальванопластика:

Комплекс физико-химических процессов, который позволяет на специальной оправке создать изделие с формой оправки. Точность изготовления оправок должна быть на несколько классов выше, чем у изделия.

2 вида оправок:

1. Не разрушаемые (возвратные) – из каленой стали.
2. Разрушаемые (невозвратные) – из материалов с низкой температурой плавления, или из тех материалов, которые могут быть удалены химическим способом.

Наиболее часто применяются сборно-разборные оправки.



1. Заготовка – проводящая или непроводящая
2. Химически осажденное серебро
3. Гальванически осажденная медь
4. Гальванически осажденная медь или железо

5. Опрессовочный материал, обычно пластик АГ4В.

Химически осажденное серебро:

Фотоаппараты с пластинками. Реакция зеркала.

1. Активация
2. Сенсибилизация
3. Нарастивание химического слоя серебра.

Осаждение слоя серебра 5 микрон. Достаточно для проводки тока, но он не закреплен.

1. Нанесение меди – нанесение в щадящем режиме.
2. Нанесение меди или железа (200 микрон) – нанесение в жёстком режиме.
3. Установка в форму
4. Закрытие пластиком
5. Извлечение из формы.

Извлечение оправки от поверхностных слоев.

ТКЛР – термический коэффициент линейного расширения. Из-за него можно с небольшим усилием извлечь заготовку.

Парафина-стеариновые смеси – продукт перекачки газов.

Достоинства:

1. Получение сложных форм
2. Легкость конструкции
3. Защита от коррозии
4. Достаточная прочность.

Недостатки:

1. Изделие не может работать при больших перепадах температур.
2. Чем меньше диаметр волновода, тем сложнее извлечь оправку.

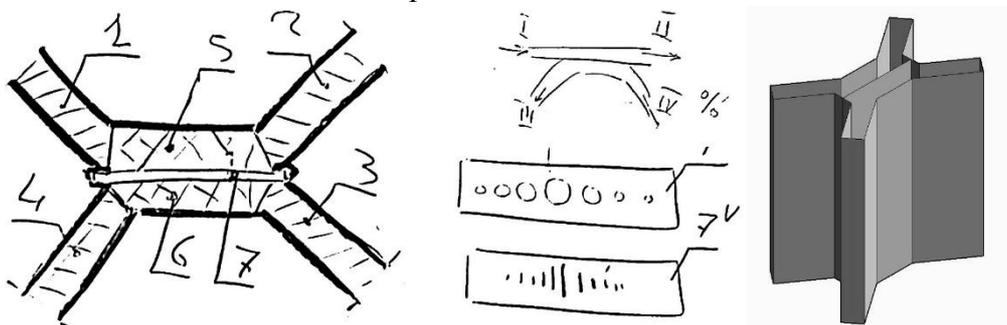
### **Комбинированные методы изготовления волноводных узлов с помощью гальванопластики.**

Применяются в тех случаях, когда невозможно изготовить возвратную оправку, а другие методы не обеспечивают точность и качество внутренней поверхности.

Известны следующие методы:

- Применение дополнительной детали
- Использование полуфабрикатов

Пример изготовления изделия комбинированным методом.



1, 2, 3, 4 – металлические оправки, не разрушаемые. 5, 6, - разрушаемые. 7 – не извлекаемая деталь.

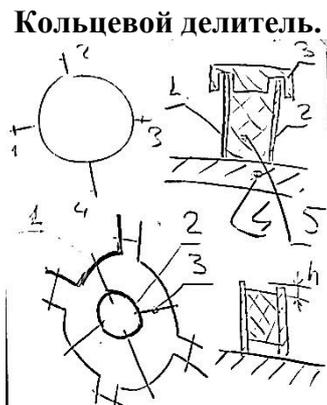
Способ изготовления направленного ответвителя «Комбинированный метод с дополнительной деталью (7). 7 – обеспечивает работу устройства и требует высокой

точности изготовления отверстий связи, поэтому она изготавливается отдельно с использованием лазерной, эрозионной или электроискровой обработки.

Деталь размещается между 5 и 6, собирается полный комплект и все это отправляется на линию гальванопластики.

После опрессовки пластмассой извлекаются 1-4; 5,6 удаляются нагреванием и выплавлением. Деталь 7 остается внутри.

### Применение полуфабрикатов.



Если на одно из плеч подается сигнал, то на остальных он распределяется в определенных пропорциях.

3. фиксирующее устройство, 4. основание, 5. парафина-стеариновые смеси  
Толщина  $h$  – несколько мм.

Существует способ изготовления корпусов с помощью прессования из пластмассы или керамики с последующим химическим омеднением и гальваническим наращиванием. Возможно металлизация корпусов с помощью лазерного напыления. Защита от внешних воздействий.

Методы соединения волноводных узлов.

Из-за конструктивной сложности большинство СВЧ устройств не могут быть выполнены в виде 1 изделия, поэтому необходимо применять соединительные устройства.

### Соединители:

- Коаксиальные разъемы
- Плоские контактные фланцы
- Дроссельные фланца
- Жесткое соединение – холодная сварка

#### Требования к соединителям:

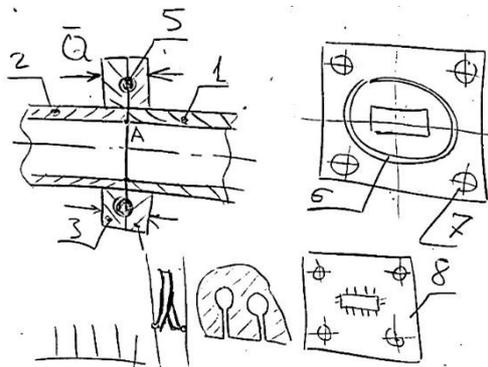
- Минимальный коэффициент отражения от стыка (КСВ) – сохранение структуры поля.
- Максимальная электрогерметичность – максимальное прижатие 2 фланцев.
- Максимальная механическая прочность – нужны соответствующие элементы крепления.
- Максимальная технологичность

### Фланцы

#### Общие требования:

1. Перпендикулярность поверхности фланца оси волновода
2. Неплоскостность поверхности фланца
3. Качество поверхности
4. Точность расположения фиксирующих элементов. – для соосности.

Плоские контактные фланцы.



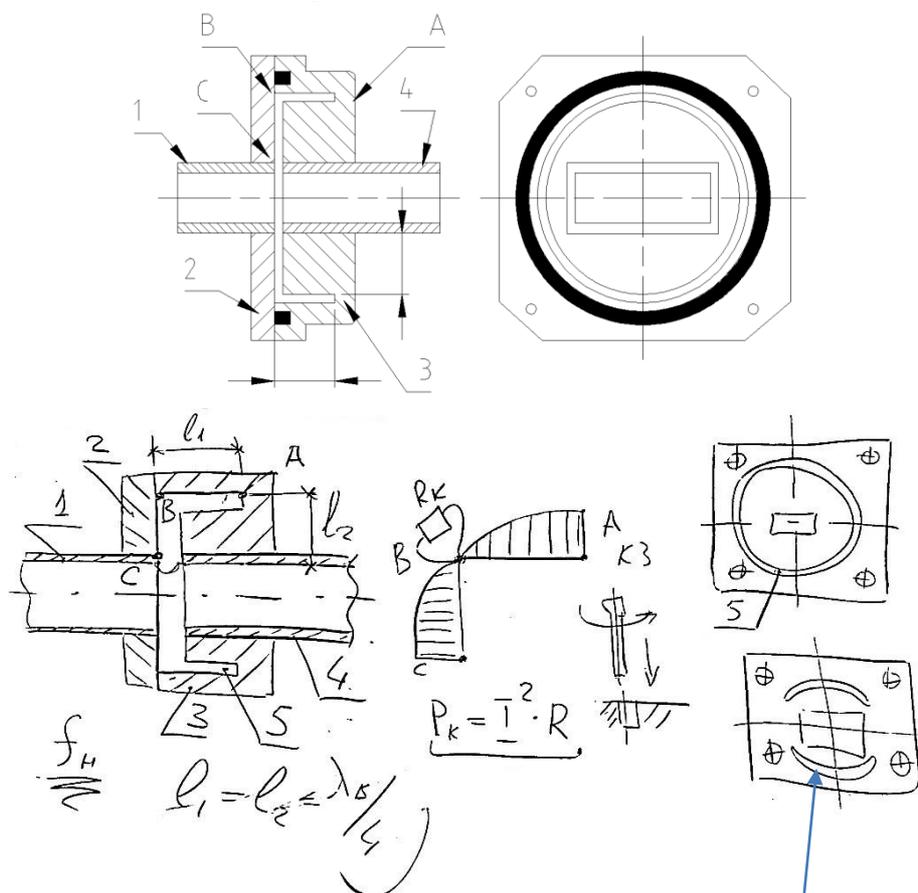
1,2 волноводы, 3,4 – фланцы, 5,6 – герметизирующая прокладка. Кольцевая проточка, 7 – закрепление, 8 – прокладка из бериллиевой бронзы с насечкой.

Для повышения электрических характеристик применяют разные прокладки, из прокатанного олова или свинца. Они разовые и обеспечивают надежный контакт в местах, где есть повышенный уровень мощности.

Достоинства: Простота; Маленькая металлоемкость; Нет частотных ограничений

Недостатки: Качество контакта ухудшается при многократной сборке и разборке из-за окисления поверхности. При деформации, вибрации, повышенном уровне мощности.

### Дроссельное соединение:



Потери в точке В минимальны.

Достоинства:

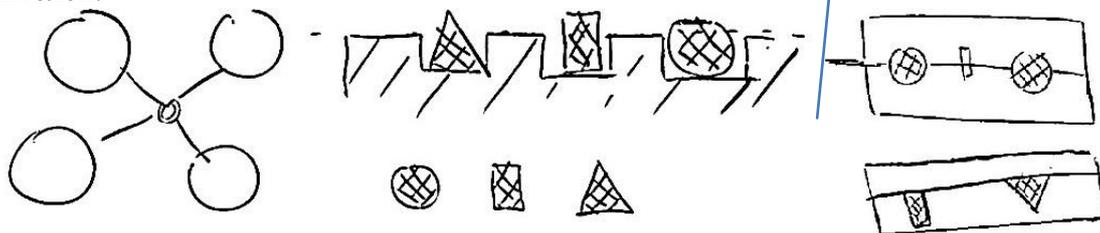
- Данное фланцевое соединение свободна от недостатков контактных фланцев.

Недостаток:

- Меньше технологичность
- Избыточная металлоемкость
- Это соединение только для  $\lambda_B/4$  – узкополосная. Для 1-10 ГГц – полоса частот 15% от  $f_0$ , а в диапазоне 10-30 ГГц – 6%. При этом КСВ 1,05...1,09.
- Электрогерметичность – 100 дБ.

Для упрощения конструкции иногда применяют дроссельные фланцы с секторальными вырезами. Изготавливается торцевой фрезой.

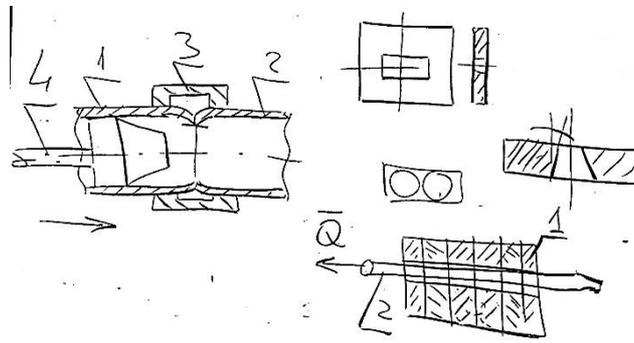
Для защиты от внешних воздействий м.б. изготовлены канавки для резиновых уплотнителей.



Для того чтобы сделать волноводный тракт несколько метров использую холодную контактную сварку.

3 – соединительная муфта.

Немного развальцовываем концы и, с помощью штока (4) и создает неразъемное соединение.



*Создание плоских волноводных фланцев:*

1. Вручную – фрезерованием.
2. На станках ЧПУ – дорого.

Изготовление зависит от:

- Объема производства
- Точностных требований
- Имеющегося оборудования на производстве.

В мелкосерийном производстве фланец вырубается по контуру с пробивкой окна. Пробитые фланцы собираются в пакет (1) и с помощью протяжки (2) устраняются все углы и формируется сразу посадочное место под соответствующий размер волновода.

В массовом производстве фланцы изготавливаются:

- Литьем
- Горячей штамповкой.

Дроссельные фланцы в мелкосерийном производстве изготавливают на станках с ЧПУ, в серийном производстве применяется жидкая и горячая штамповка.

*Жидкая штамповка.*

Жидкая штамповка – металл нагревается до температуры плавления + 150°, заливается в форму, застывает и после образования твердой поверхности в пресс-форму вдвигается пуансон, который формирует все канавки и обнижения фланца. После чего он совершает несколько ударных действий для окончательного формирования. В этом случае используются литейные металлы (латунь и т.д.).

*Горячая штамповка.*

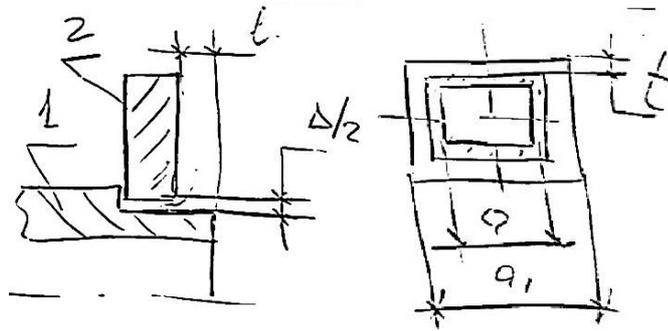
Горячая штамповка – делают заготовки механическим способом (режут дисками), заготовки нагреваются (латунь – до 800°C, алюминий – до 450°C), затем заготовка размещается в матрицу и с помощью кривошипного прессы формируется окно и канавки. В обоих случаях необходимо провести отжиг в нейтральной среде и доработать посадочное место фланца и дроссельные канавки механическим способом.

**Этапы сборки волноводных изделий:**

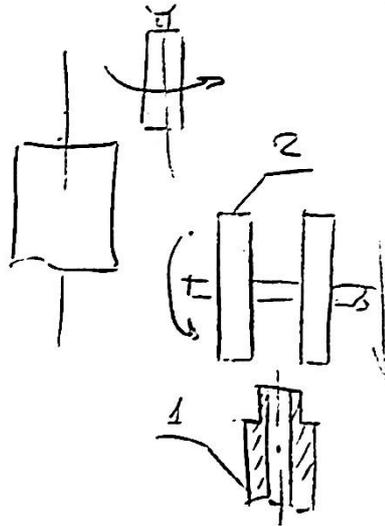
### 1. Подготовка волновода и фланца

Волновод (1), фланец (2).

Фланцы изготавливаются с фиксированным размером, то нам необходимо изготовить волновод с обнижением, где  $\Delta/2$  – суммарный зазор между волноводом и фланцем (0,05-0,15 мм). Он определяется материалами металла и припоя, и должен быть таким, чтобы припой затягивался в этот зазор.  $l$  – выбирается такой, чтобы расплавленный припой не попал во внутренний канал волновода (1-2 мм).



$t$  – размер обнижения изготавливается фрезой по периметру или, в серийном производстве дисковые фрезы (волновод – 1, дисковая фреза – 2).

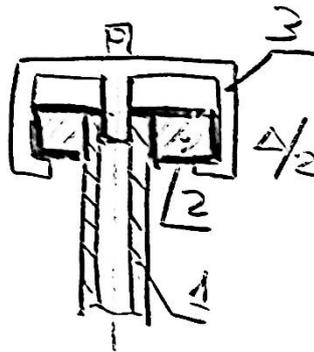


## 2. Установка ориентации и фиксации фланца

1 – волновод

2 - фланец

3 – приспособление, фиксируется на канале волновода и закрепляет фланец симметрично каналу волновода, т.е. выдерживает зазор по периметру.



## 3. Соединение (пайка, сварка, склейка)

Осуществляется:

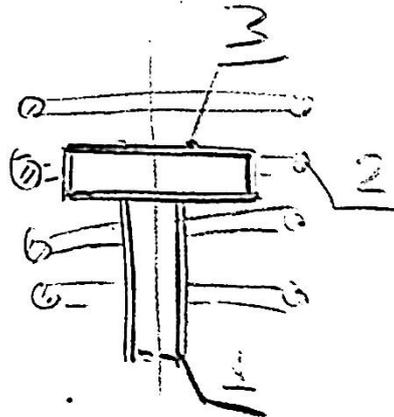
а. Пайка газовой горелкой с твердыми серебросодержащими припоями ПСр 25, ПСр 40.

$t_{пл} = 450$  °С.

- Достоинства:
  - простота
- Недостатки:
  - Наличие открытого огня приводит к окислению.

- Неравномерный нагрев и остывание может привести к деформации и отклонению размеров.
- Место соединения м.б. покрыто окислами

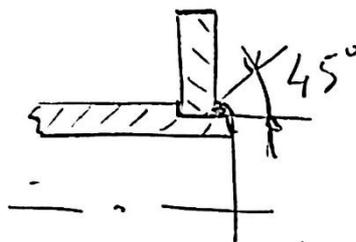
Для сварки тонкостенных листов применяют ВЧ индукторы. Если металл поместить в переменное ВЧ поле, он будет нагреваться за счет токов Фуко



Достоинство: Чистое, Недостаток: Высокая себестоимость. Соляные ванны – расплав солей бария, натрия. Помещается фланец и припоем, нагрев, процесс, остывание. Применяется только в крупносерийном производстве.

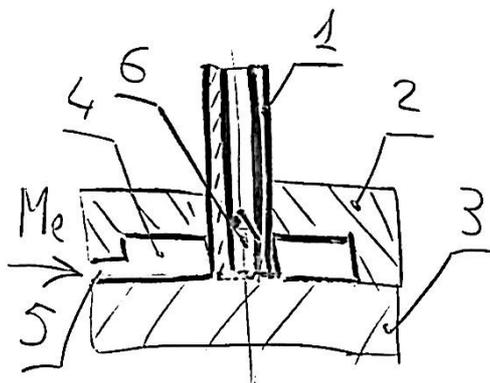
Достоинство: Равномерность прогрева, отсутствие деформации и окислов. Недостаток: очень вредное производство, если происходит сбой электроэнергии, получается «кирпич» из соли с электродами внутри.

#### б. Сварка



- Ручная
- Автоматическая

#### в. Литьевая сварка



- 1) Заготовка
- 2) 3) Литьевая форма

- 4) Полость формы, центрирующая фланец
- 5) Входное отверстие для подачи металла
- 6) Центрирующий вкладыш

Получается прочное механическое соединение, который не надо паять.

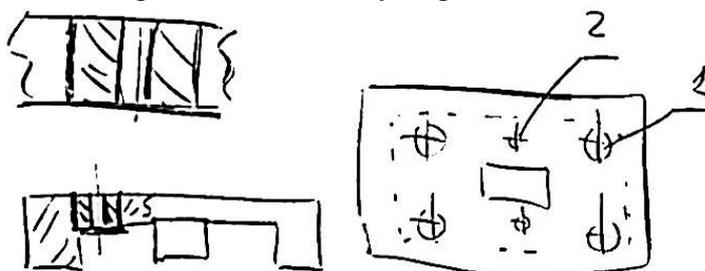
## г. Склеивание

– в ММ диапазоне, и где нет нагрузки можно применять специальные клеи для соединения волноводов. Это способ применяется там, где не желательно перепадов температур. Не терпит ударов.

Клей КОНТАКТОЛ (эпоксидная смола с отвердителем и наполнителем из серебряной или алюминиевой пудры).

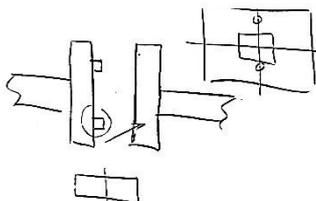
## 4. Обработка плоскостей, формирование канавок, установочных и крепежных отверстий.

Механическая доводка фланца. Необходимо добиться нужной шероховатости поверхности, нужно сформировать дроссельные и уплотнительные канавки, просверлить фиксирующие отверстия, базирующиеся на канале волновода. Для сверления отверстий и формирования канавок применяют станки с ЧПУ. При небольшом производстве применяются кондукторы.



### Установочное отверстие

Для фиксации фланцев, обеспечивающих совмещение каналов волноводов.

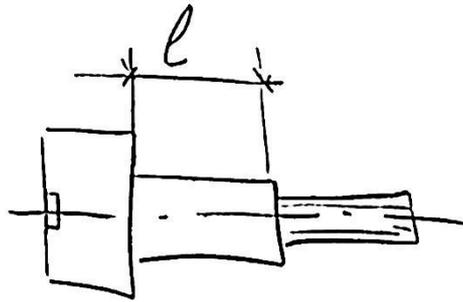


### Крепежное отверстие

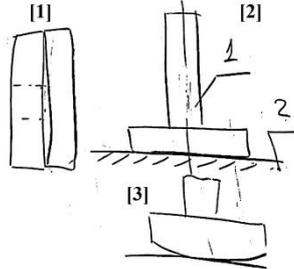
Для соединения фланцев друг с другом

Применяются специальные винты, которые имеют некоторую цилиндрическую связь, которые обеспечивают и совмещение оси и скрепления 2 фланцев. В этом случае установочные не нужны.

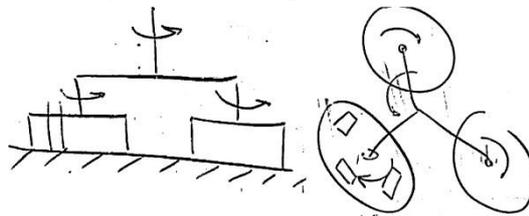
В ММ диапазоне – без установочных никак.



Сама доводка делается для того, чтобы не происходило [1] при соединении. Для этого используется специальное приспособление [2] (1 – фланец, 2 – чугунная плита), которое доводит край волновода до состояния [3], при котором [1] уже не происходит.



Для групповой обработки используется такое приспособление:



### Волноводные нагрузки.

Устройства СВЧ для поглощения падающей или отраженной мощности называются волноводными нагрузками.

Устройства для поглощения частичной проходящей мощности называются аттенуатором.

Основа – поглотитель:

- Поверхностный
- Объемный

Основные параметры:

1. Минимальный КСВ  $1 \dots 1,05$  (если именно граничные числа – согласованная нагрузка).
2. Частотный диапазон – весь диапазон рабочих частот волновода
3. Максимальная рассеиваемая мощность
4. Тип волновода и используемый поглотитель.

По мощности разделяются на 3 группы:

1. 1-100 Вт – маломощный
2. 100 Вт – 1 кВт
3. >1 кВт – мощные

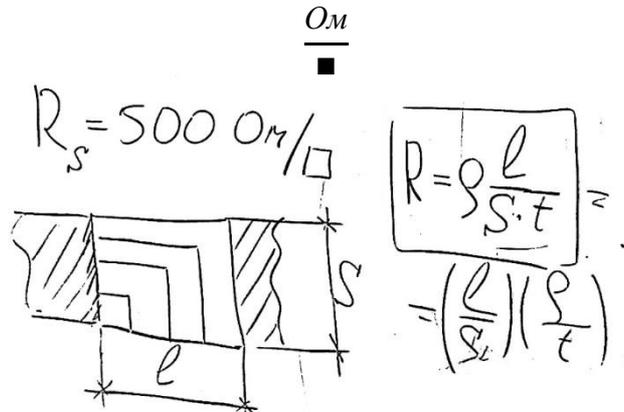
Основано на поглощении поверхностных токов Фуко, либо в объемных поглотителях.

#### 1. Поверхностные поглотители.

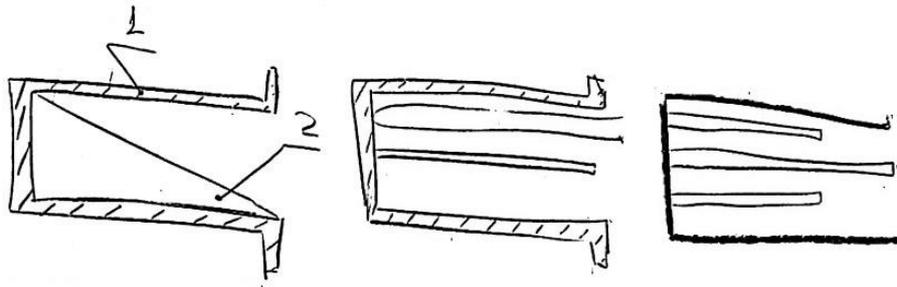
Основание – диэлектрическая пластина с нанесенным резистивным слоем. Материал – слюда и стеклотекстолит (маломощные), керамика (среднемощные).

Резистивный слой – нихром со средним сопротивлением  $R_s = 500 \frac{\text{Ом}}{\square}$

Толщина 1-2 скин слоя. Для защиты от климатических воздействий покрывается защитой лаковой пленкой.



Поверхностные нагрузки и их общие виды:

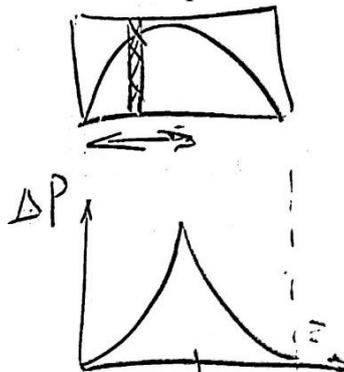


1 – волновод, 2 – клин

### Аттенюаторы:

*Регулируемый аттенюатор.*

1-Волновод 2-пластичный поглотитель 3-держатель

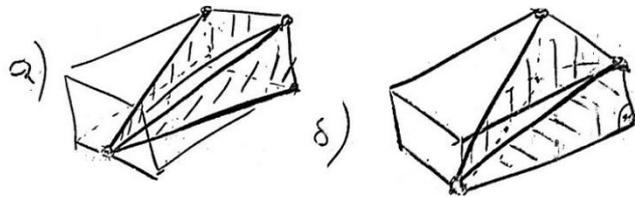


Максимальные потери в середине, и длина электрических держателей - половина размера волновода. Общая длина согласованной нагрузки для обеспечения минимального КСВ -  $\lambda/2$ . ГОСТов нет, но есть отраслевые стандарты.

### Объемные поглотители.

Материал клина – графит, глина, резина с соответствующими наполнителями. Форма клина м.б. различной.

Лучшая форма – скошенная пирамида (а). Или, еще 1 вариант – пирамида с прямым углом у основания (б).



Сравним эти варианты с точки зрения КСВ и эффективности поглощения.

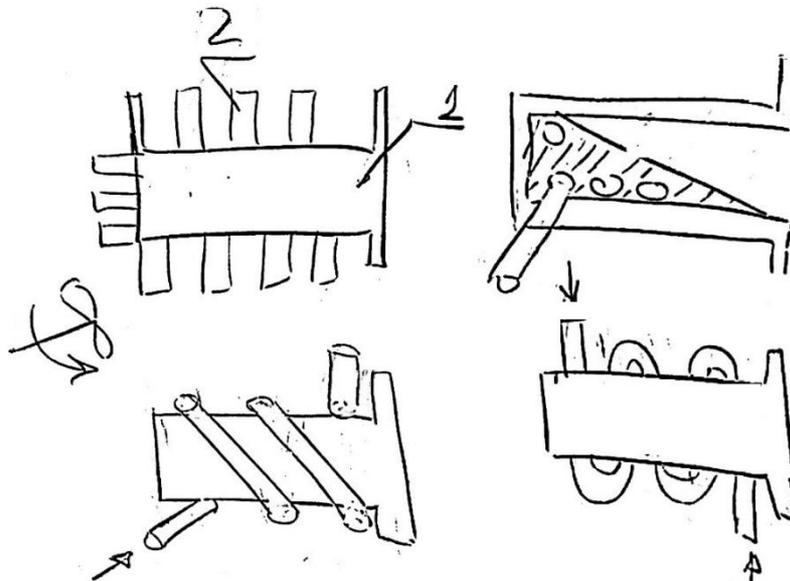
а- приемлем для эффективного поглощения

б – для эффективного КСВ.

Оптимальная форма клина – . Используется в измерительных приборах. Используется на среднем и высоком уровне мощности.

На среднем и высоком уровне мощности используется воздушное охлаждение и охлаждение жидкостью.

Но обычно используется радиатор. 1-волновод 2-оребрение. Плюс внешнее охлаждение. Это может быть обдув. Для особо мощных нагрузок берется то же самый волновод и для него формируется рубашка, через которую подается охлаждающая жидкость. Можно пропустить рубашку через сам клин.



Материалы для объёмных поглотителей те же, окисел алюминия порошкообразный. Для особо мощных нагрузок (в режиме антенного эквивалента, дежурный режим, но не идет в эфир) используют керамику на основе тех же окислов алюминия.

## Ферриты на СВЧ

Феррит – сложный твердый раствор с кристаллической структурой, получаемой спеканием окисла железа с окислами никеля, цинка, меди, марганца и др.

Изготовление: механическое перемешивание окислов, добавляется пластификатор и спекается и так несколько раз.

Это твердый, но хрупкий материал.

Удельное сопротивление  $10^5 - 10^9$

Диэлектрическая проницаемость от 10 до 30, тангенс диэлектрических потерь  $10^{-4} \dots 10^{-3}$

Основные свойства феррита

Магнитная индукция  $\vec{B}$  зависит от напряжённости через тензор магнитной проницаемости.

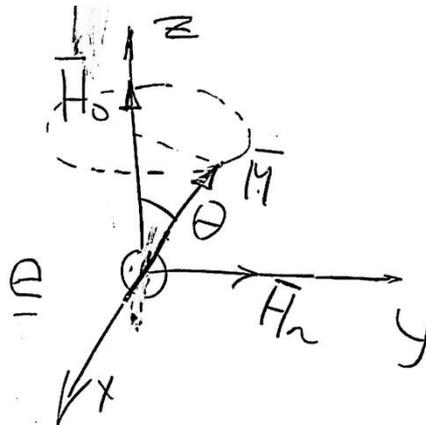
Тензор – линейный оператор, который превращает один вектор в другой

$$\vec{B} = \vec{\mu} \cdot \vec{H} \quad \vec{\mu} = \begin{vmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{vmatrix} \quad B_x = \mu_{11}H_x + \mu_{12}H_y + \mu_{13}H_z$$

Приложение постоянного магнитного поля – свойства феррита меняются, т.е. он с анизотропными свойствами.

Волновод, содержащий намагниченный феррит, обладает свойствами:

1. Невзаимным вращением плоскости поляризации
2. Необратимым фазовым сдвигом поляризации
3. Необратимым смещением структуры СВЧ поля
4. Резонансными потерями.

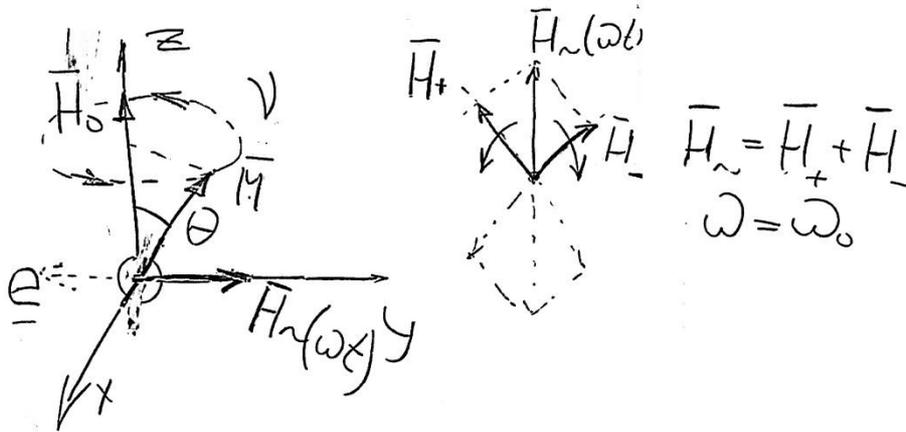


Электрон обладает собственным магнитным моментом, при появлении магнитного поля  $H_0$ , не совпадающего с магнитным моментом, электрон начинает совершать вращение вокруг оси – прецессию, постепенно их магнитное поле  $H$  и  $M$  выравниваются. Это гиромангнитное явление.

Движение осуществляется с частотой  $\nu_0 = 2,8 H_0 (\text{ЭРСТ}) (\text{МГц})$ .

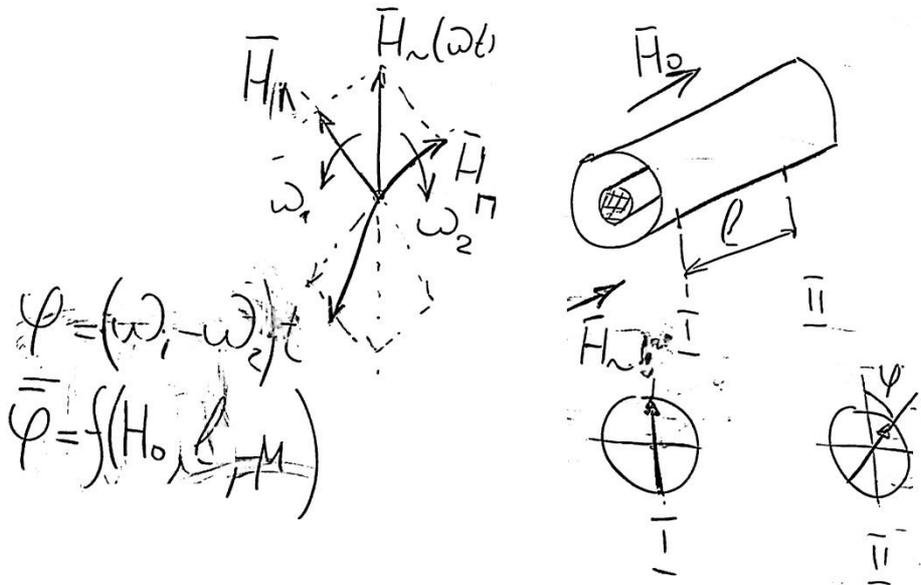
При появлении переменного поля СВЧ, вектор  $M$  начинает отклоняться.

Поле  $E$  – поляризованное.

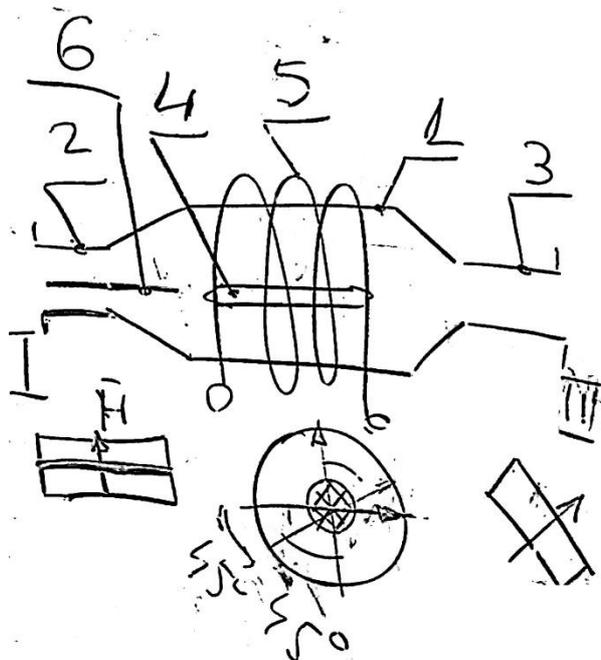


В этом случае поле начинает эффективно поглощаться, составляющая  $H_-$  вращается в противоположном направлении и не испытывает этих свойств, в результате чего поле  $H_{\text{ПЕРЕМ}}$  начинает поглощаться в феррите. На этом принципе строятся электромагнитные аттенюаторы.

**Возьмем круглый волновод**



## Вентиль

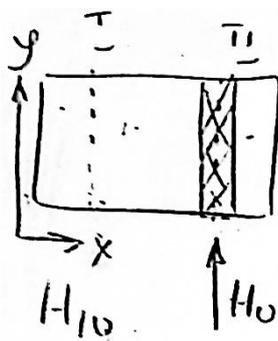


Для развязки генераторов нагрузки.

Основные требования к развязывающим компонентам:

- 1) Высокие электрические параметры
    1. Большая развязка
    2. Минимальный КСВ
  - 2) Простота конструкции
  - 3) Надежность
  - 4) Отвод тепла
  - 5) Технологичность
  - 6) Себестоимость
- 1) Вентили резонансного типа. В основе лежит явление поглощения СВЧ энергии в ферритовой среде при ферритмагнитном резонансе. В плоскости  $\Pi$  – круговая поляризация поля. Поле  $H_0$ . Если волна распространяется в направлении  $+z$ , то.
  - 2) Круглый волновод.
    1. Волновод; 2 – Феррит; 3 – Магнит; 4 – Круглый волновод.

В варианте, а – более эффективности с т.з. намагниченности, т.е. размеры магнитной системы меньше, т.к. система замкнута, в варианте б – эффективнее отвод тепла, при поглощении феррит нагревается.



Для создания магнитного поля используются постоянные магниты.

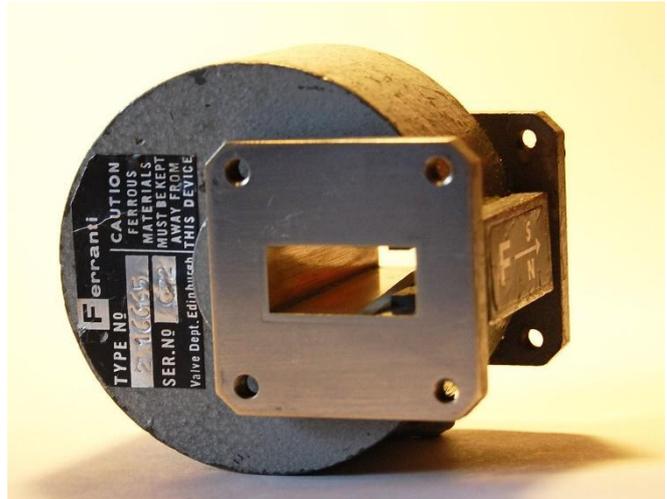
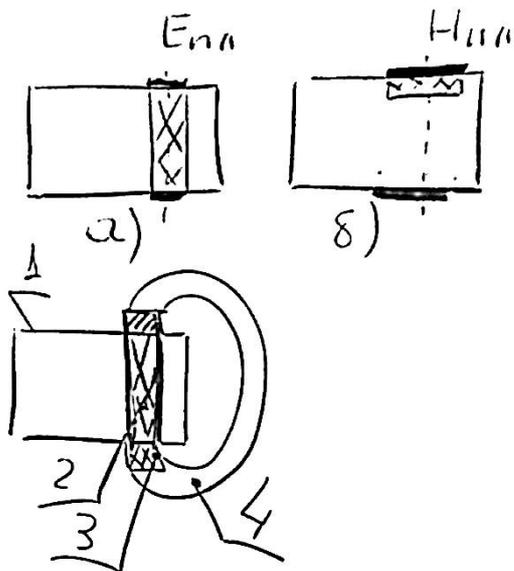
Широкополосное согласование данных устройств достигается путем согласования частот достигается путем размещения

1 – волновод

2 – ферритовая пластина

3 – активатор – это пластина, имеющая  $\epsilon$  близкое к  $\epsilon$  среднее.

Диэлектрик (активатор) имеет меньшие потери, чем феррит и не меняет своих свойств в этом диапазоне частот



В устройствах с невысоким уровнем мощности применяются заниженные волноводы

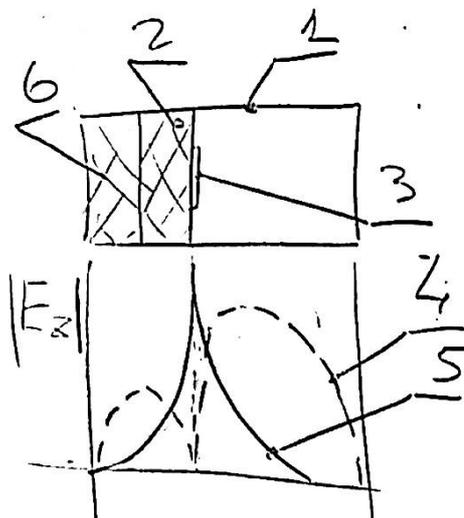
2. Вентили со смещением поля. Применяются в СМ диапазоне на более низких уровнях мощности. Более просты в конструкции, компактны и надежны.

Принцип работы основан на эффекте смещения поля при относительно широкой ферритовой пластине и малых полях намагничивания.

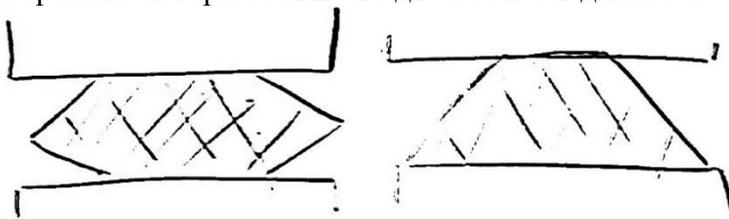
При размещении тонкой ферритовой пластины происходит смещение поля для прямой и обратной волны.

1. Волновод
2. Толстая ферритовая пластина
3. Поглощающий резистивный слой с напыленным на нее нихромом.
4. Поле прямой волны
5. Структура обратной волны. – для нее поглощение наиболее эффективно.

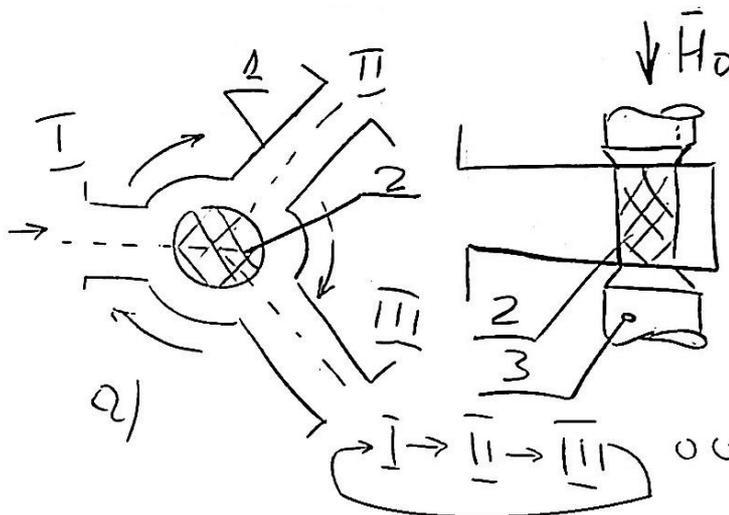
Для увеличения диапазона частот добавляется 6 – активаторы



Для того, чтобы уменьшить КСВ, пластины должны иметь согласующий элемент. Длина согласующих клиньев –  $\lambda/2$ . Эффективная длина пластины – полтора  $\lambda$ . Обратные потери больше 20 дБ. Это все в диапазоне частот 20 %.



3. Волноводный Y-циркуляторы. Применяются на низких и высоких уровнях мощности в СМ и ММ диапазоне волн 3 плеча. Основная цель – создать циркуляцию, перераспределение направления  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ . 1 – волновод, 2 – ферритовый цилиндр, 3 – система намагничивания.

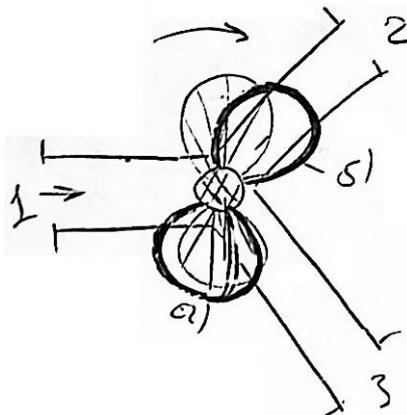


Дифракция поля на диэлектрике. При попадании поля – диаграмма рассеивания имеет вид.

При  $0$  – диаграмма а.

При  $>0$  – диаграмма б.

Необходимо такое поле, чтобы диаграмма развернулась и ее минимум был в плече 1. При этом в плече б будет большая часть поля и некоторая часть отразится в плечо 1, будет максимальная развязка и минимальные потери.

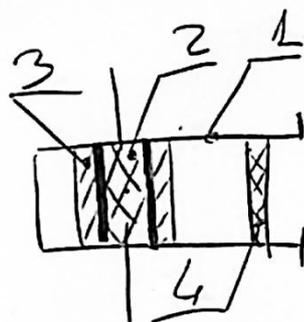


а)  $\bar{H}_0 = 0$

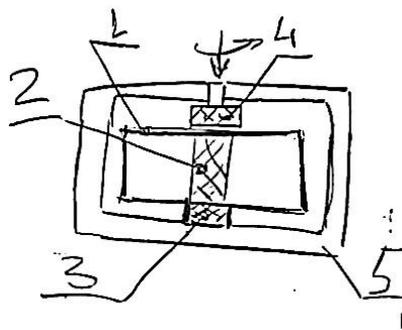
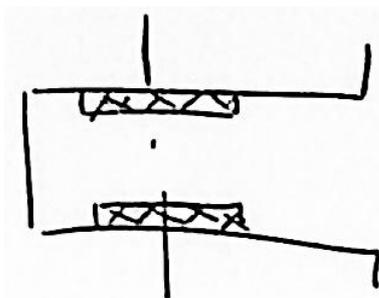
б)  $H_0 > 0$

Для уменьшения отражения применяется согласующее устройство

1 – волновод; 2 – ферритовый цилиндр; 3 – диэлектрическое кольцо (трубка); 4 – согласующий штырь.



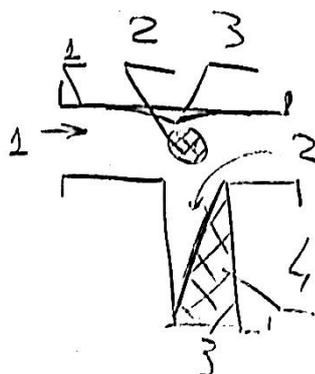
Ферритовые диски для улучшения теплоотвода.



1 – прямоугольный волновод; 2 – ферритовый стержень; 3 – неподвижный магнит; 4 – подвижный магнит, не резьбовой втулке; 5 – магнитопровод.

Позволяет наиболее точно выставить величину магнитного поля и оптимизировать развязку устройств. Т.е. ставят на плечо 3 индикатор и добиваются минимума.

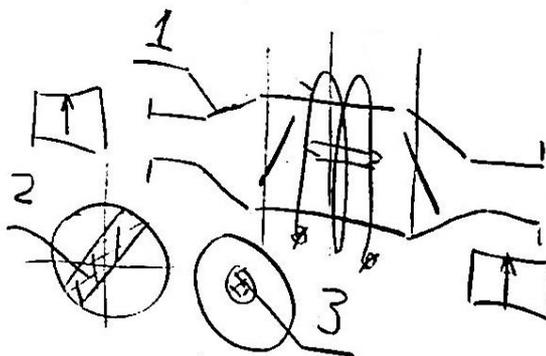
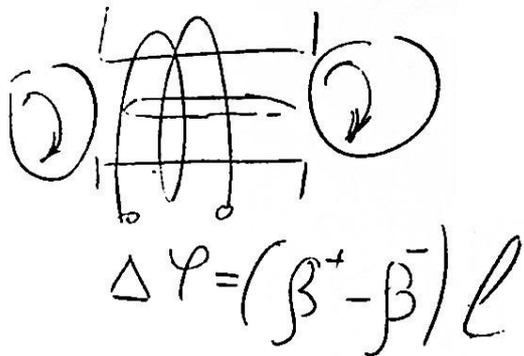
Y-циркулятор можно использовать в качестве вентиля. В этом случае он называется T-циркулятор.



1 – корпус; 2 – ферритовый цилиндр; 3 – согласующее покрытие; 4 – согласованная нагрузка

### Конструкции фазовращателей на основе эффектов Фарадея.

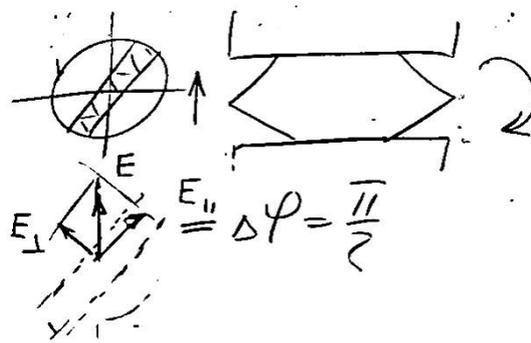
Фазовый сдвиг -  $\Delta\varphi$ .



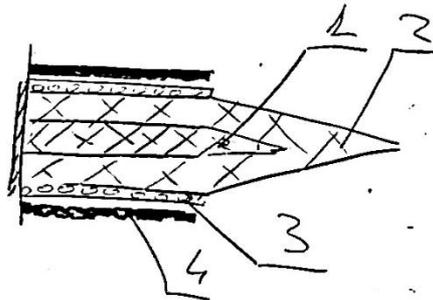
1 – корпус; 2 – поляризатор; 3 – ферритовый стержень.

Преобразование поляризации.

Но громоздко.



Рассмотрим конструкцию простейшего фазовращателя-излучателя.  
Излучатель фазированной антенной решетки.



- 1 – ферритовый стержень
- 2 – согласующая оболочка
- 3 – соленоид
- 4 – пермаллоидный (сплав железа магния и цинка) экран.
- 5 – управляющая пластина.

Элемент фазированной антенной решетки, слева, установленный на С-300. Система намагничена с помощью конструкции справа.

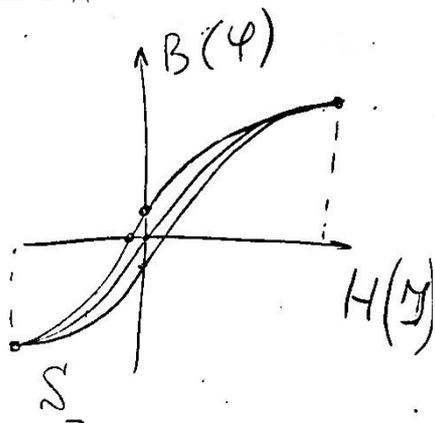
<p>1) <math>\epsilon_r \approx 16</math> ЗС4-18          2) <math>\epsilon_{\perp} \approx 10</math> СТ32-1          3) <math>\epsilon_z \approx 7</math> СТ38-1</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>1. ферритовый стержень</li> <li>2. диэлектрик</li> <li>3. конус</li> <li>4. металлическое покрытие.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 – ферритовый стержень</li> <li>2 – скобы из феррита с остаточной намагниченностью</li> </ul> <p>Получается замкнутый контур.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 – зазор.</li> </ul>

Для уменьшения потерь и увеличения надежности:

**Способы управления фазовращателями фазированных антенных решеток.**

Петля гистерезиса – определяет энергию перемагничивания.

Круглый стержень круглый волновод.



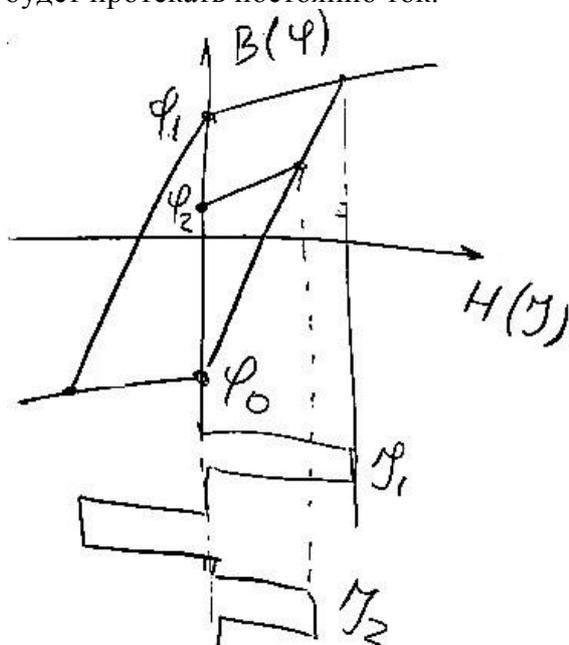
Для обхода проблем первой – замкнутый магнитопровод с прямоугольной петлей гистерезиса. Площадь определяет энергию, необходимую для перехода из одного состояния в другой.

1 Управление током

Недостаток: по соленоиду постоянно должен протекать ток.

2 Управление импульсами

При этом в соленоиде не будет протекать постоянно ток.

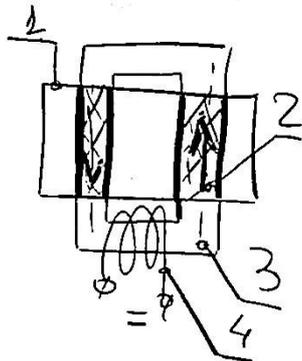


### Фазовращатели на прямоугольном волноводе.

Обладают невзаимными потерями и фазовым сдвигом.

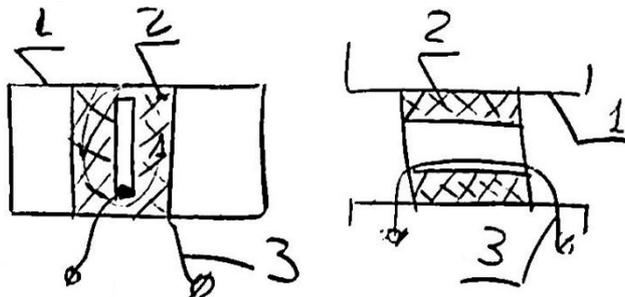
Эти фазовращатели разработаны для линейной поляризации.

1 – волновод, 2 – ферритовая пластина, 3 – магнитопровод, 4 – соленоид

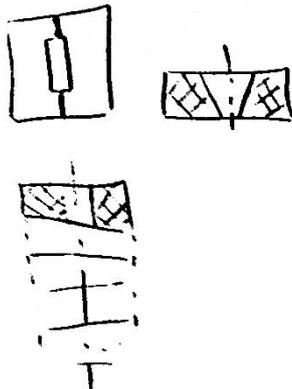


Тороидальный фазовращатель

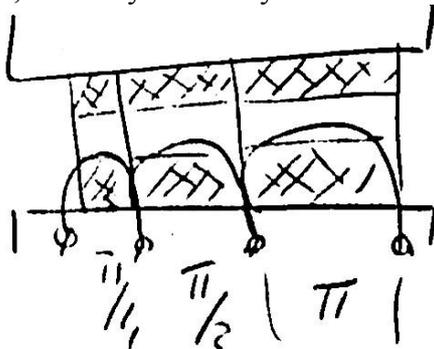
Недостаток – соленоид, для этого следующая конструкция. 1 – волновод, 2 – тороидальный ферритовый стержень. 3 – провод.



Для изготовления делают 2 половинки с комплектом шайб.



Большие токи трудно выставить, поэтому используем:



Недостаток – падение установки фазы.

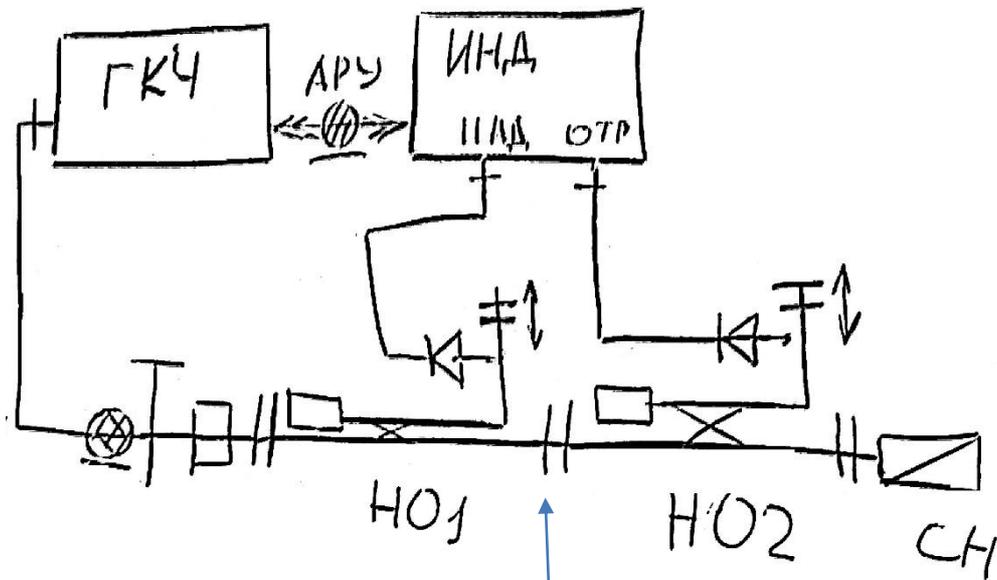
На каждый вешался тиристор, что позволяет оцифроваться, управление идет более точно. Установка фазы становится менее точной. Опыт показал, что  $\pi/4$  достаточно.

Электрические характеристики:

1. Диапазон частот
2. Пропускаемая мощность
3. Потери
4. Согласование – коэффициента отражения, КСВ.
5. Фаза

Частота меряется частотомером.

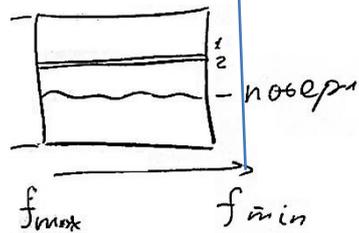
Автоматический измеритель КСВ и потерь.



- ГКЧ - Генератор качающейся волны
- АРУ - Автоматический регулятор усиления
- Инд - Индикатор
- ПАД - падающая мощность
- ОТР - отраженная мощность

Добавляем ИУ (измеряемое устройство)

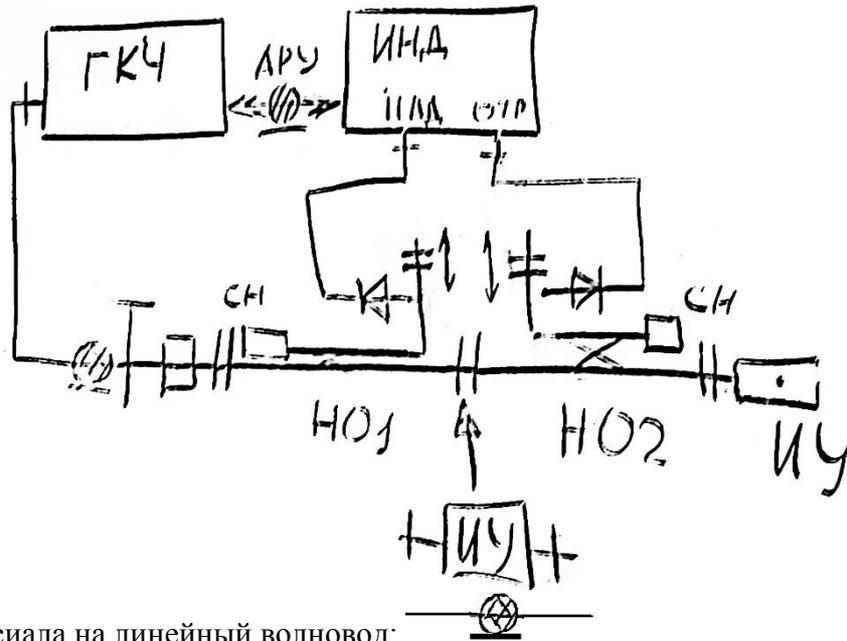
На индикаторе получаем:



Разворачиваем направленный ответвитель на  $180^\circ$

СН - согласованная нагрузка.

### Мы измеряем КСВ



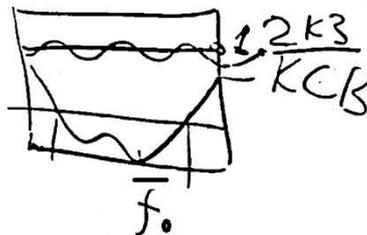
Переход с коаксиала на линейный волновод:

Для проверки калибровки ставим КЗ – короткозамыкатель. Вместо ИУ.

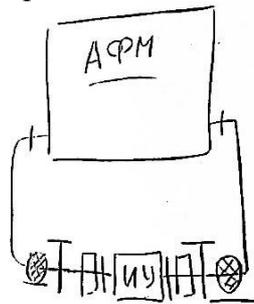
Получим график.

1 – падающая

2 – отраженная (или от КЗ).



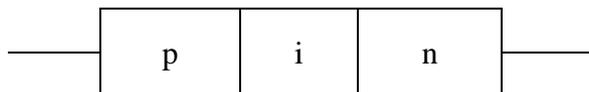
Анклизометр – измерение матрицы рассеяния.

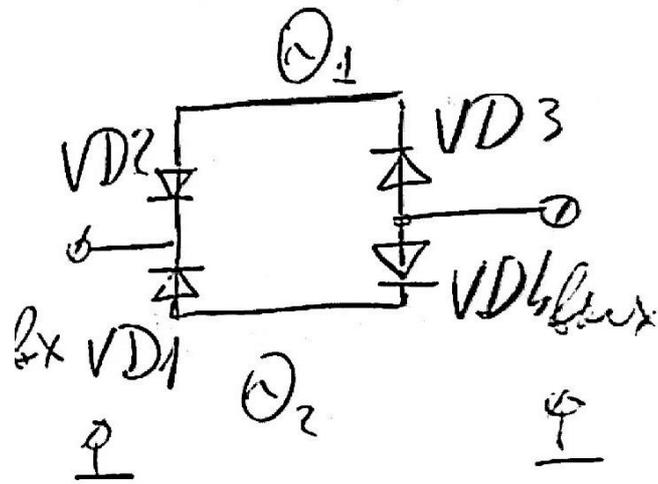


$$\begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{vmatrix} = |S|$$

### Фазовращатели на пиндерах.

Принцип основан на скачкообразном изменении фазы проходящего или отраженного сигнала.

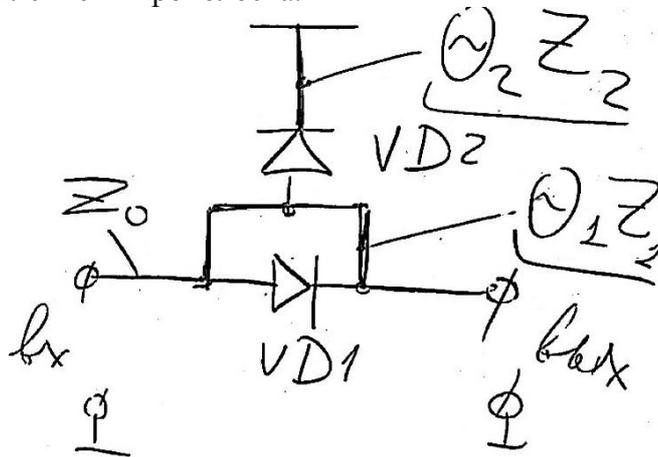




$$\Delta\varphi = \theta_1 - \theta_2$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi l_1}{\lambda}$$

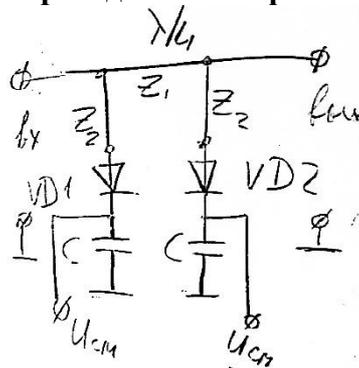
Z – Волновое сопротивление микрополоска.



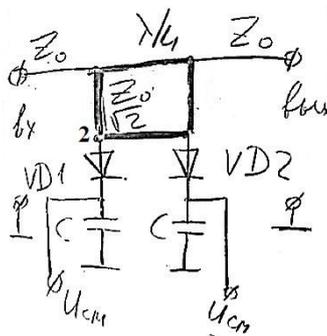
$$\Delta\varphi = \theta_1 \quad \cot\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \cot\theta_2 = 2Z_2/Z_0$$

3 – е устройство

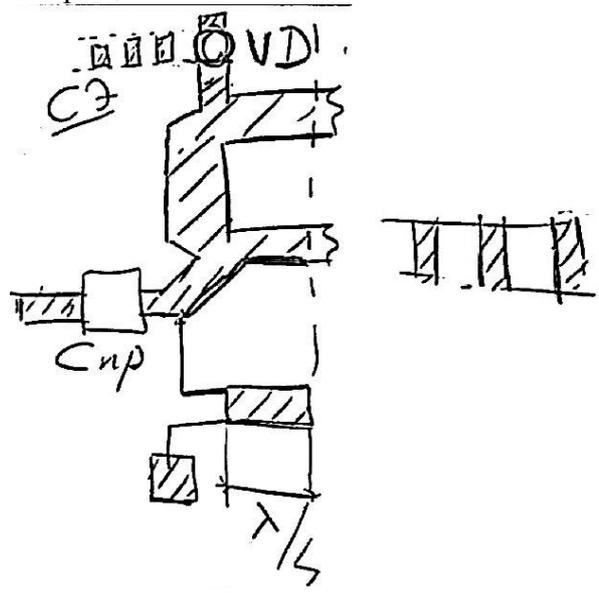
**Одноразрядный проходной шлейфный фазовращатель.**



Проходной фазовращатель с использованием четвертьволнового моста

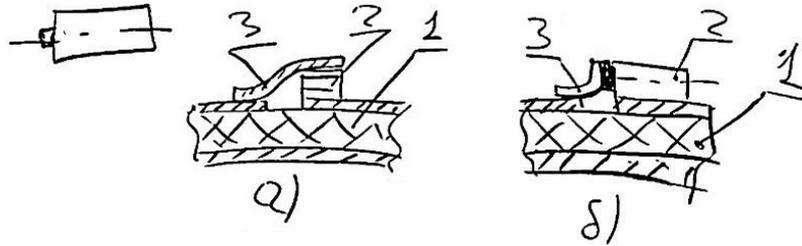


Половинка топологии фазовращателя

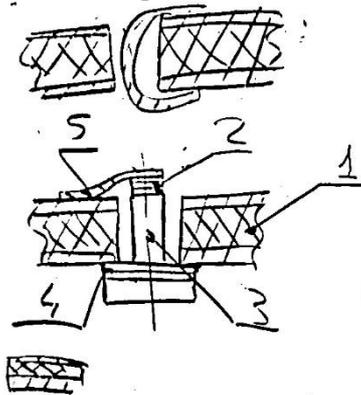


## Способы установки элементов на плату

Выполняются с держателями.

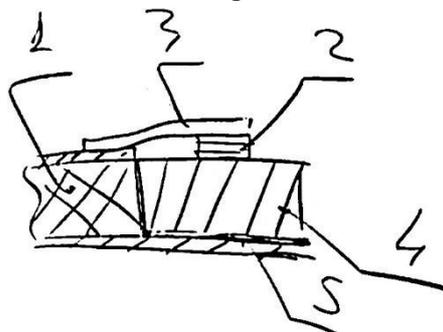


1 – микро полосковая линия 2 – диод 3 – перемычка



Для уменьшения потерь:

4 – радиатор, 5-оксидный слой, выполняющий роль дискового конденсатора

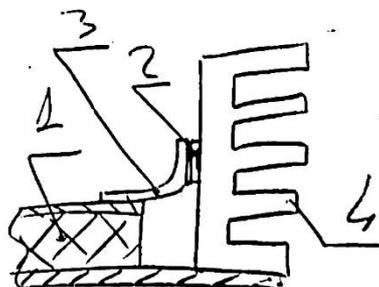


1 – микрополосковая линия

2 – диод

3 – перемычка

4 – радиатор



## Конструирование и изготовление корпусов для гибридных интегральных микросхем СВЧ.

Модуль СВЧ должен иметь функциональную и конструктивную завершенность.

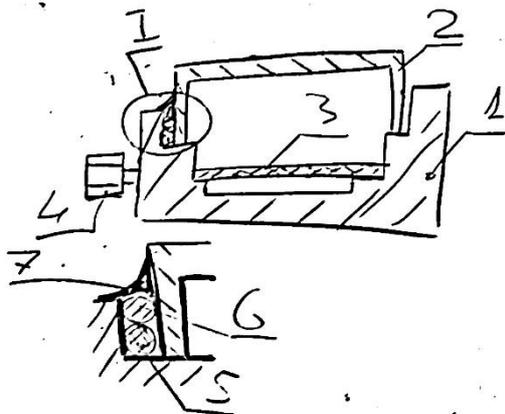
### Виды корпусов:

- коробчатый (чашечный).
- Рамочный
- Пенальный
- технологический (экспериментальный)

- пластинчатый

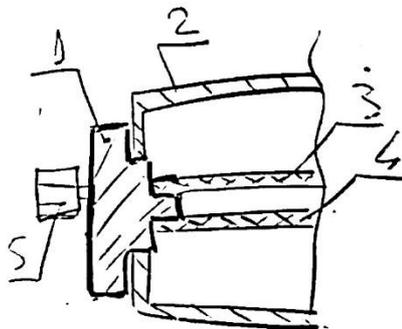
#### *Чашечный корпус*

1. Корпус 2 крышка 3 плата 4 СВЧ разъем 5 прокладка 6 провод это запаивается по периметру, 7 – галтель.



Достоинства – простота конструкции, небольшая длина герметизирующего шва.  
 Недостатки – можно использовать для плат с односторонним монтажом. Сложность обеспечения контакта между платой и корпусом. Материал изготовления корпуса – латунь дюраль. Часто на плату напаивается тонкая металлическая сетка для термокомпенсации между платой и корпусом.

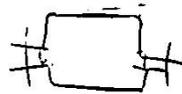
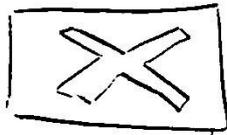
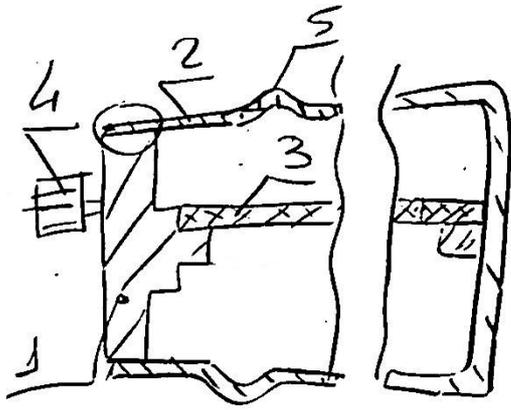
#### *Рамочный*



1 – корпус, 2 крышка 3 4 две платы. Преимущество – две платы. Недостаток – вес.

#### *Пенальный корпус.*

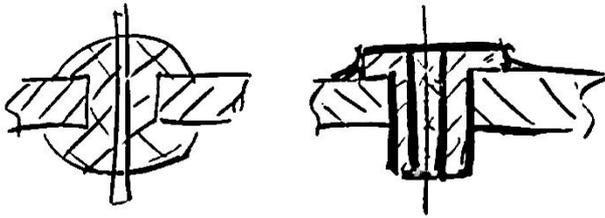
1 корпус 2 пенал 3 плата 4 разъем 5 ребро жёсткости.



Как изготовить такой корпус? Так. Мб вытяжкой.

Недостаток – все разъёмы должны быть расположены с одной стороны.

Как подать низкочастотный сигнал управления?



### Технологические корпуса.

Пластичный корпус состоит из рамки корпуса и много чего ещё. Используются в микрополосковых фильтрах. Достоинства: простота конструкции, технологичность, ремонтпригодность. Недостаток зависимость параметров устройства от качества сборки.

Сложность герметизации.

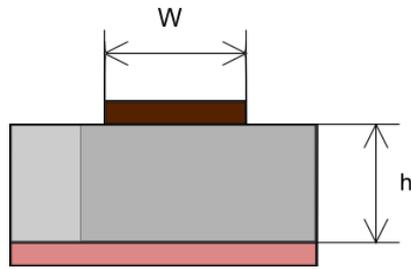
Функционально можно разместить несколько устройств. Все подложки подпаиваются к единому основанию. Защита от механических воздействий.

### Микроминиатюризация СВЧ

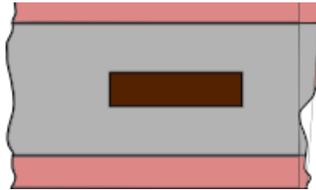
1. Заполнить волновод диэлектриком  $\Rightarrow$   $h-h$  снижаются в 5 раз;
2. Уменьшается длина волны;
3. Используются микрополосковые линии передач;
4. Гибридные интегральные схемы СВЧ.

#### Типы линий передач:

- 1) микрополосковая линия;
- 2) несимметричные;

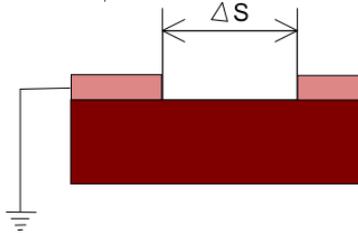


3) симметричные



Достоинства: размеры, технологичность, снижаются потери;  
 Недостатки: снижение мощности по сравнению с волноводами.  
 Невозможно повысить волновое сопротивление.  
 Симм мин → нет поверхностного Излучения, но сложнее

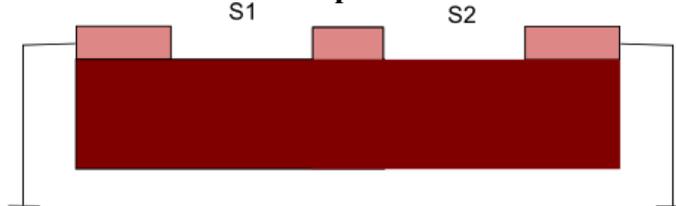
**Щелевая линия**



Волны H-типа

Достоинства: повышение волнового сопротивления за счет р-ров и формирования зазора.  
 Снижается поверхностное излучение. Можно строить невзаим. устройства на ферритовой подложке (за счет волн R).  
 Удобен поверхностный монтаж навесных элементов, уменьшающих габариты.

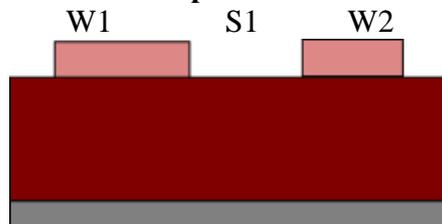
**Компланарные линии**



Волна квази Т-типа (поперечные).

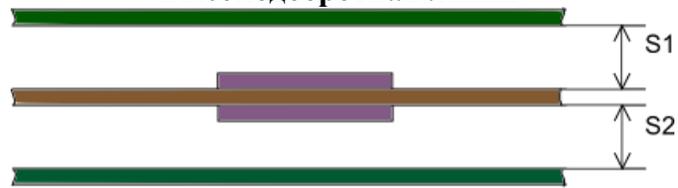
Повышение волнового сопротивления. Эллиптическое поляризация поля в подложке.  
 Используют для изготовления циркуляторов, нет отсечки по НЧ.

**Связанные микрополосковые линии**



Связь за счет общего ЭМ-поля, и определяется шириной зазора и шириной полосков.  
 Различают синфазное и противофазное включения. В зависимости от этого идут чет и нечетные волны.  
 Связанные линии используют для конструирования ответвителей, делит и фильтров.

### Высокодобротная линия



Такая линия использует В узкополос А с макс крутыми фронтами: снижение потерь, повышения добротности, возможное повышение волнового сопротивления. Очень большой спектр волн, но чаще всего – квази – Т.

Недостатки: сложность изготовления.

### **Подложки для ГИС СВЧ**

Подложки — это диэлектрическое основание, на котором формируется устройство для основания микрополосковой линии передач.

Выбор подложек:

- 1) Степень миниатюризации (по  $\epsilon$  диэл. проницаемость);
- 2) Минимальные потери (диэлектрик, по  $\text{tg}$ );
- 3) Теплопроводность (через заземление основания или отделения радиаторы);
- 4) Мех прочность (вибрация, одиночные удары, серии);
- 5) Стойкость материала к агрессивным средам;
- 6) Способность обработки с мин шероховатостью;
- 7) Пористость/ влагопоглощение;
- 8) Материал должен иметь набор подложек определенной толщин;

Наиболее популярны керамики. Ситаллы на основе стекла с наполнителем: СТ32-1 СТ38-1 СТ15. - диэл.проницаемость:10,7,15

Для изготовления невзаимных устройств нет подложки, поэтому используют ферриты. Часто используется структура граната: 10С46 30С46 90С4. диэл. проницаемость 15-16

Теплостойкость 250 градусов. Все подложки изготавливаются по ост 60х48.

### **Выбор основания для ГИС**

- 1) Анализ ТЗ на устройство и условия его эксплуатации;
- 2) Выбор материала из требований миниатюризации и констр.;
- 3) Оценка потерь;
- 4) Оценка влияния разброса геометр параметров и диэлпроц.;
- 5) Экономичность соображения: себестоимость, освоенный процесс производства, состав поставок подложек.

### Технологические методы изготовления проводящих слоев

Метод изготовления	Толщина пров. Мм	Мин шир Пров, мм	Мин зазор Между пров.	Допуска	Материалы слоев и толщины, мм
Химико-гальван. Ме + Фотолитография	<25	70-100	50-70	±25	Палладий (0,01-0,5 мм), Хим Cu (0,2-0,5) Гальв Cu (3-20) Защит Ме покр (1-10) Доп покр (1-5)
Вакуумное напыление + Фотолитография	20	40-70	30-50	±10	Адгез подслоя Ti Ванадий (0,01-0,05) Cu (5-20) Защит. Покрытие (1-10) Ni
Вакуумное напыление + Фотолитография + гальваническое наращивание	10	30	20	±5	Адг подслоя (0,01-0,5) Cu (1-2) Гальв Cu (5-20) Защ покр (1-10)
Вакуумное напыление гальваническое наращивание + Фотолитография	20	40-70	30-50	±10	-----
Тонкопленочная технология	25	75-100	75-100	±30	Пров слой на осн Ag Au Pb

Самый точный метод М-д 3, у него самый низкий зазор. 2 и 4 близки по параметрам. Но 4 дешевле

Все методы различаются по способу нанесения слоев, получения рисунков, технологичности (сложность оборудования и процент выхода годных).

#### Проводники на подложках

Проводник - основной элемент ГИС. Пример мат. Должны иметь ТКЛР, сравн с подл, хорошо паяются и подверг сварке, иметь высокую проводимость и высокую адгезию (как с подложки, так и между слоями)

В качестве защитных слоев используют олово-висмут, олово, Au, Ag. На частоте меньше 2 ГГц, кот первым ложится на подлож практич не поврежд. 2-5 скин-слоев.

Контактная площадка – минимальная неоднородность, размеры на 0.2 мм больше вывода. Для пайки мин 500х500 мм, для сварки 300х300 мм. В ряде случаев перед контактной площадке ставят дополнительные согласующие шлейфы.

Толстые проводники имеют повышенные потери (до 0.2 дБ/см для ГГц-волн).

#### Элементы микрополосковых узлов СВЧ

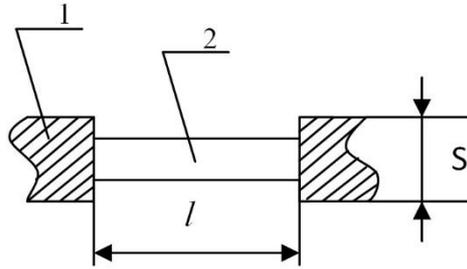
Делятся на две группы:

- элементы со сосредоточенными параметрами;
- элементы с распределенными параметрами.

К первой группе относятся элементы, размеры которых существенно меньше длины волны – параметры элемента не зависят от его размеров.

Ко второй – элементы, размеры которых соизмеримы с длиной волны или больше ее. В этом случае элементы являются отрезками длинных линий и их параметры являются функцией координат и размеров данного элемента.

## Резисторы



$\rho_{\square}$  – поверхностное сопротивление пленки (Ом/кв)

$$R = \left(\frac{l}{S} \rho\right) = K_{\phi} \cdot \rho_{\square}$$

Таким сопротивлением обладает резистор с произвольной стороной.

$K_{\phi} = \frac{l}{S}$  - коэффициент форм.

Резисторы изготавливаются методом напыления из вольфрама. Резисторы размером  $K_{\phi}=1$ , отличаются друг от друга площадью и рассеиваемой мощностью, но имеют одинаковый номинал.

$$P = \frac{I^2}{R} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{кв}} \right]$$

Конструкция пленочного сосредоточенного резистора (а) и частотная зависимость активной составляющей его сопротивления (б): контактная площадка; 2- полосковый проводник.



Резисторы широко используются в цепях питания и управления, в схемах сумматоров и делителей мощности, резистивных аттенуаторов в качестве согласованных нагрузок. Применяют резисторы двух типов: распределенные и сосредоточенные.

Распределенные резисторы выполняются на основе МПЛ с большим вносимым затуханием, которое создается за счет высокого поверхностного сопротивления полоски  $R_s$ . МПЛ изготавливается либо из материала с низкой проводимостью, либо должна иметь толщину, значительно меньшую глубины скин-слоя. Для уменьшения размеров такие линии сворачиваются в меандр или спираль, подобно распределенной индуктивности. Сосредоточенный резистор представляет собой отрезок линии передачи с высоким поверхностным сопротивлением. Длина  $l$  этого отрезка много меньше длины волны в линии (рис, а). Перекрытие  $\square$  резистивной пленки с проводящими линиями обеспечивает надежный стабильный контакт. При реализации сопротивлений от 25 до 500 Ом перекрытие составляет 0,7...0,2 мм.

Номинальное сопротивление резистора определяется выражением:

$$R = \frac{R_s l}{\omega}$$

Где  $R_s$  - поверхностное сопротивление слоя [Ом/мм];  $l$  и  $\square$  - длина и ширина соответственно резистивного слоя. Для напыления резистивных плёнок используют тантал, нихром, хром.

Структура такого резистора имеет распределенную ёмкость, которую можно приближенно оценить по формуле для плоского конденсатора. Если пренебречь влиянием

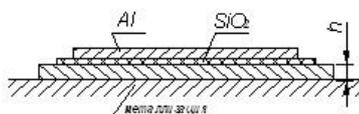
распределенной индуктивности, комплексное сопротивление резистора может быть определено из соотношения:

$$\dot{Z} = \frac{R}{1 + j\omega C \frac{R}{3}}$$

Пленочные резисторы длиной не более 1 мм можно применять на частотах до 18 ГГц. Увеличение их длины приводит к снижению верхней частоты рабочего диапазона. Для устранения влияния паразитной шунтирующей ёмкости удаляют часть металлизации непосредственно под резистором на противоположной стороне подложки.

Одной из важнейших характеристик резисторов является допустимая мощность рассеивания, которая зависит от теплопроводности материала подложки и площади резистивной пленки. Для резистора, выполненного на поликорковой подложке толщиной 1 мм, при температуре подложки 70...80 °С удельная мощность рассеяния составляет 5...10 Вт/см<sup>2</sup>. Чтобы избежать локальных перегревов, резисторы обычно проектируют на мощность рассеяния около 0,5 Вт. При большей мощности рассеяния применяют распределенные резисторы либо резисторы в виде сектора или трапеции

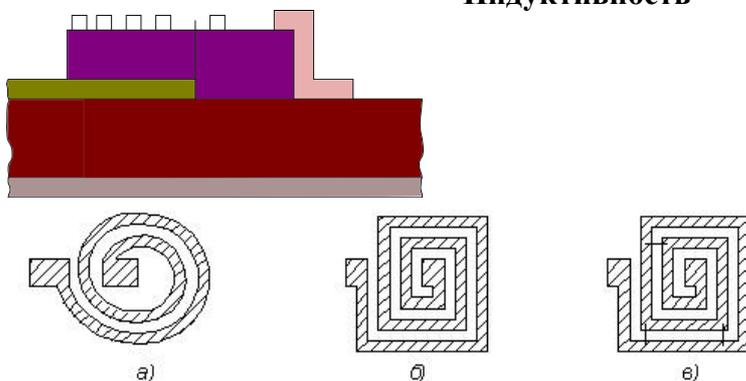
*Конденсаторы.*



Технология изготовления таких конденсаторов во многом сходна с технологией изготовления транзисторных и диодных структур. Роль нижней обкладки играет пластина сильно легированного кремния (n+). На ней выращивается пленка диоксида кремния, толщину которого можно уменьшать до 0,3...0,5 мкм, не опасаясь пробоя. Это позволяет получать высокие значения удельной ёмкости. При толщине пленки SiO<sub>2</sub> - 0,4 мкм, удельная ёмкость составляет 100 пФ/мм<sup>2</sup>. Пробивное напряжение при этом может достигать 100 В и выше. Пленка алюминия, напыляемая поверх диэлектрика термическим испарением, является второй обкладкой конденсатора. Нижняя плоскость конденсатора припаивается к контактной площадке на подложке.

В качестве навесных конденсаторов в интегральных устройствах СВЧ применяют миниатюрные керамические конденсаторы типа К10-42 на частотах до 2 ГГц, представляющие собой параллелепипеды из керамики, торцы которых металлизированы и облужены. Конденсаторы устанавливаются с помощью пайки на контактные площадки, как показано на рис. 2.10. На частотах до 1,5...2 ГГц используют также конденсаторы типов К10-9, К10-17, К10-43, имеющие аналогичную конструкцию.

### Индуктивность



При расчете индуктивностей можно пренебречь, если толщина подложки в 10...20 раз превышает ширину проводника. При необходимости для устранения влияния экрана металлизация на нижней стороне подложки непосредственно под индуктивностями

удаляется. Расчет индуктивностей можно провести с помощью справочных материалов. Подстройка индуктивностей может осуществляться запайкой перемычек контактных площадок (рис. в), что позволяет изменять число витков.

Для экономии площади плоские катушки могут выполняться в многослойном варианте. Витки индуктивностей располагаются на керамических пластинках, которые наклеиваются друг на друга, при этом осуществляются все необходимые соединения.

В нижней части диапазона СВЧ часто применяются обычные малогабаритные катушки индуктивности.

#### **Навесные элементы**

- Это конденсаторы, резисторы, диоды и т.д
- Генераторные и усилительные диоды;
- Лавинопролетные повышают уровень генерируемой мощности, повышение частоты до 250 ГГц, повышение коэффициент шума;
- Туннельные диоды, имеют меньшую генерирующую мощность и снижение коэффициента шума;
- Диоды Гана;
- Переключающие диоды (Пин-диоды);
- Транзисторы до 10ГГц. Главным образом планарная технология.

#### **Конструирование и изготовление корпусов для интегрированных схем СВЧ**

Конструктивно модуль выполняется в виде корпуса с СВЧ и НЧ разъемами.

*По параметрам делятся на:*

- - приемные;
- - передающие;
- - приемно-передающие;
- - однофункциональные.

*Основные требования к корпусам:*

- - экранирование;
- - механическая прочность;
- - минимум массы, габаритов;
- - герметичность, коррозионная стойкость;
- - теплопроводность;
- - технологичность.

#### *Типы корпусов:*

- ❖ - коробчатый;
- ❖ - рамочный;
- ❖ - пенальный;
- ❖ - пластинчатый;
- ❖ - технологический.

#### *Коробчатый*

- Корпус
- Крышка
- Подложка
- СВЧ- разъем
- Медная проволока
- Припой
- Резиновая герметичная прокладка
- Плата чаще всего приклеивается или припаивается к корпусу.

Достоинства: простота конструкции, небольшая длина герметичного шва.

Недостатки: сложно обеспечить электрический контакт между платой и корпусом.

#### *Рамочный*

- Рамка
- Крышка
- Подмышка
- СВЧ разъем

#### *Пенальный*

- пенал
- ребра жесткости
- СВЧ разъем

Достоинства: Маленькая длина герметичного шва.

Недостатки: все разъемы с одной стороны.

#### *Пластинчатый*

- Корпус в виде рамки
- Крышки
- СВЧ разъем
- винты по периметру
- симметричная микрополосковая линия.

Достоинства: абсолютная простота в изготовлении.

Недостатки: качество работы зависит от параметров окружающей среды и равномерности прижима стенок.

#### *Технологический*

- Корпус
- Подложка
- Коаксиально-полосковый переход

Достоинства: универсальность.

## Анализ и синтез СВЧ-устройств

Анализ – определение свойств устройств по его геометрии и по параметрам использованных материалов.

Синтез – определение геометрических размеров по заданным свойствам.

*Основные характеристики устройства:*

- КСВ, потери, АЧХ, ФЧХ;
- Конструктивные
- массогабаритные;
- экономическая себестоимость;
- технологичность.

*Различаются 3 основных класса синтеза:*

- I. Классический синтез. В этом случае используется математическая модель. Аналитический аппарат математики для выставления электромагнитных полей и ЭВМ для вычислений. Точность и требования самые простые и минимальные.
- II. Диалоговый синтез. Он основан на целенаправленном переборе вариантов анализа с помощью ЭВМ.
- III. Машинный синтез (численная оптимизация). Направленный перебор вариантов анализа по заранее подготовленным категориям. Алгоритм поиска оптимального решения, он может быть классическим, а может быть основан на индивидуальном подходе.

Анализ и синтез проводят на математических моделях различной сложности.

Все эти процессы хорошо описываются уравнениями Максвелла.

В уравнение Максвелла необходимо добавить граничные условия. Приравняв граничные условия можно получить поля.

Электромагнитное поле – представляется в виде рядов в области, в которой распространяется поле.

Если волновод прямоугольный, то поле синусоидальное/косинусоидальное с соответствующими коэффициентами.

Для круглого волновода поля описываются функциями Бесселя, так называемыми г. Флоке.

Для упрощения вычислений:

Весь тракт разбивается на отдельные участки.(прям линии)

После рассчитываем матрицу рассеивания

Для большинства имеется уже готовые матрицы рассеивания

Для ... необходимо сложить все эти матрицы рассеивания

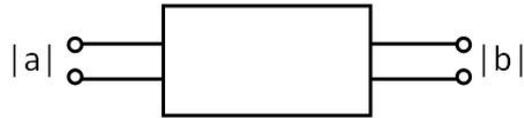
Размерность матрицы определяется числом волн рассеивания в волноводе, в это число включают как распространяющиеся, так и затухающие волны

Практика показывает, что для предварительной оценки можно использовать одноволновый режим, т.е. при расчетах учитывают только низшая основная волна

В полученных моделях будем называть плечом отрезок линии передачи, по которому подводится СВЧ-сигнал.

Матрица рассеивания устанавливает связь между амплитудами радионесущих и отраженных волн во всех плечах устройства.

$$|b| = |S| \cdot |a| \qquad \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{vmatrix} \qquad |b| = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix}$$



Матрица рассеивания должна быть нормирована, поэтому для получения нормированных коэффициентов матрицы рассеивания все ее элементы, находящиеся на одной строк должны быть разделены.

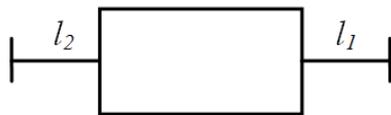
$$K = \frac{a_p a_p^*}{2}$$

После нормировки все коэффициенты становятся симметричными.

$$[S]^T \cdot [S] = 1$$

$$\begin{cases} \sum |S_{ik}|^2 = 1 \\ \sum S_{ip} S_{iq} = 0 \end{cases} \quad \text{- условие правильности решения.}$$

Если к устройству подводят отдельные линии, то появляются коэффициенты.



$$S_{pq}^e = S_{p\Sigma} e^{-j\varphi_p}$$

$$\varphi_p = \beta_p l_p$$

Наиболее распространенными являются Microwave Office и Serenada.

Эти два пакета помогают смоделировать большинство задач в СВЧ.

Serenada - в плоскости;

Microwave Office – позволяет рассчитать в пространстве.

ИСТОК позволяют осуществить технологическую оптимизацию микросхем СВЧ.