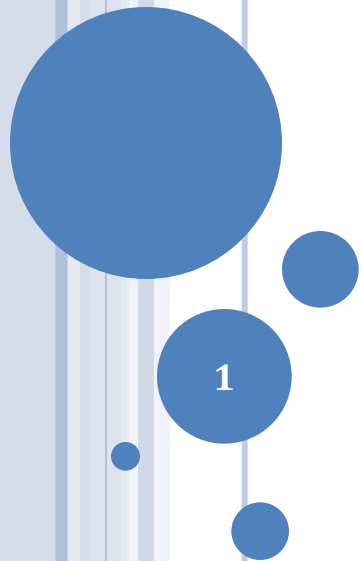


# КОМПОНЕНТЫ СВЧ



# ОСОБЕННОСТИ ВОЛН СВЧ ДИАПАЗОНА

- Размеры аппаратуры соизмеримы с длиной волны на сверхвысоких частотах
- Волны СВЧ диапазона обладают квазиоптическими свойствами
- Волны СВЧ диапазона беспрепятственно проникают через ионизированные слои, окружающие Землю, и слои атмосферы

# КЛАССИФИКАЦИЯ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Классификация частотных диапазонов  
в соответствии с российским стандартом

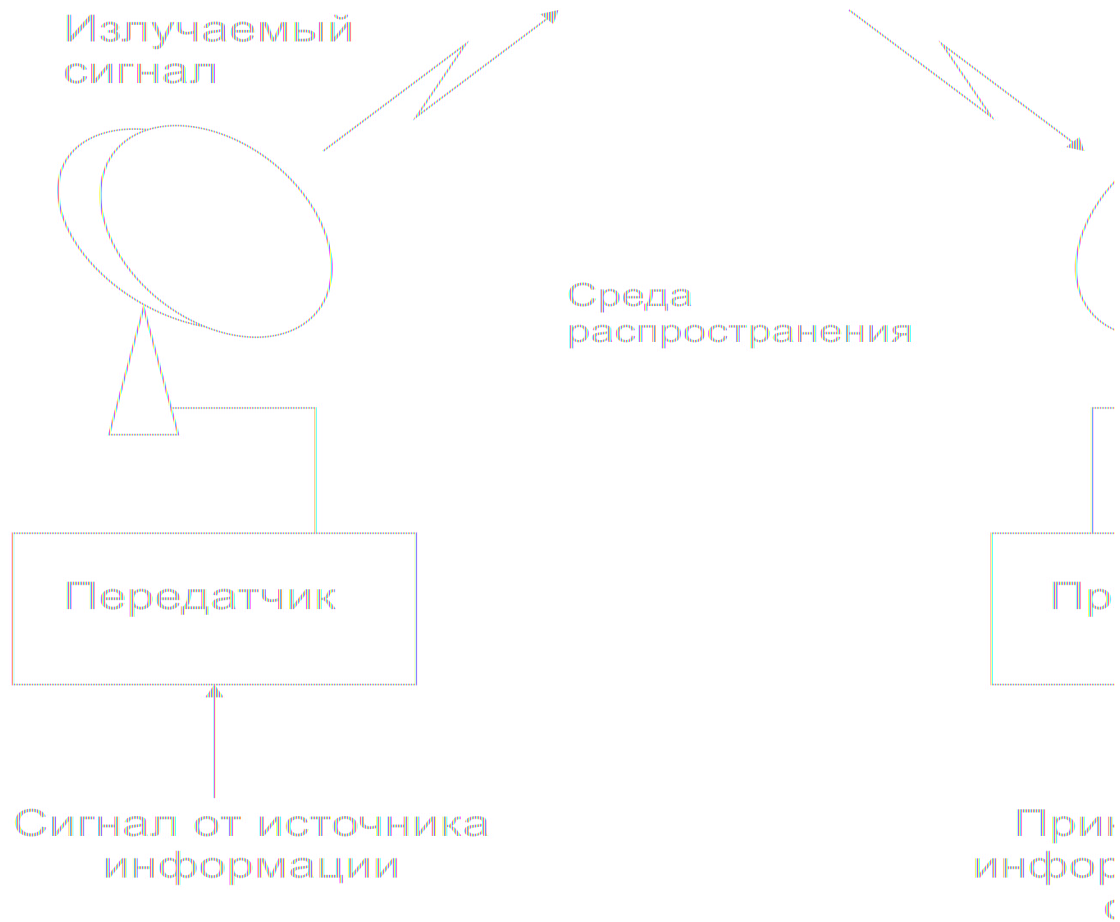
Частота (ГГц)	Название
0,3—3	Ультравысокие частоты(УВЧ) (дециметровые)
3—30	Сверхвысокие частоты(СВЧ) (сантиметровые)
30—300	Крайневысокие частоты(КВЧ) (миллиметровые)

# КЛАССИФИКАЦИЯ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ

## Зарубежная классификация

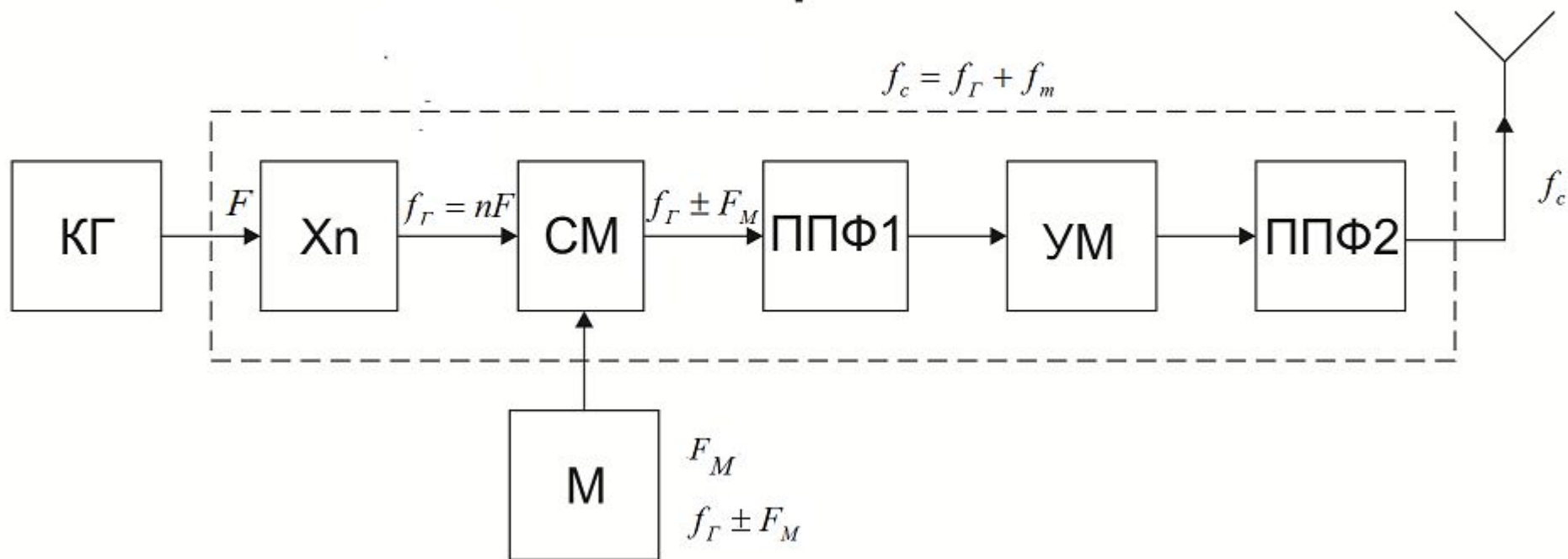
Частота (ГГц)	Название
0,4—2,7	L
2,7—4	S
4—8	C
8—12	X
12—18	Ku
18—26	K
26—40	Ka
>40	mm wave

# СИСТЕМА СВЯЗИ

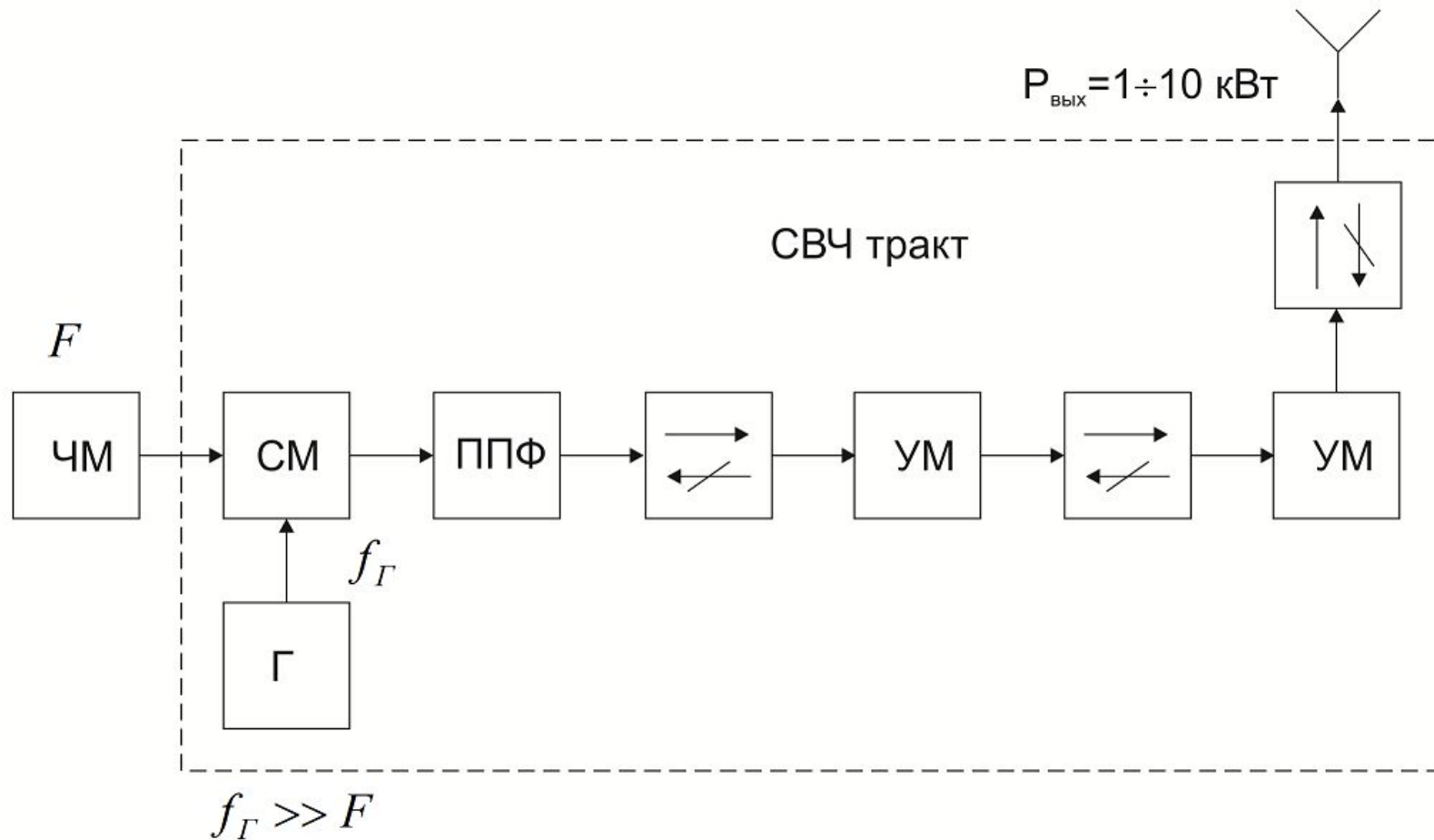


# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПЕРЕДАТЧИКА РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

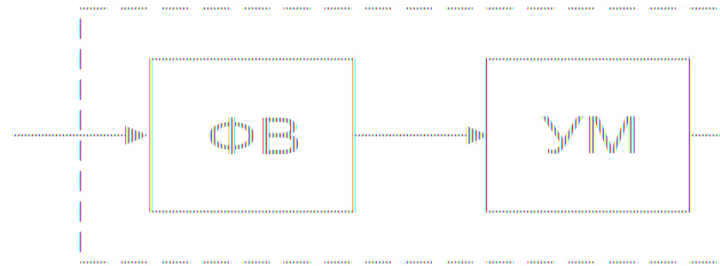
## СВЧ тракт



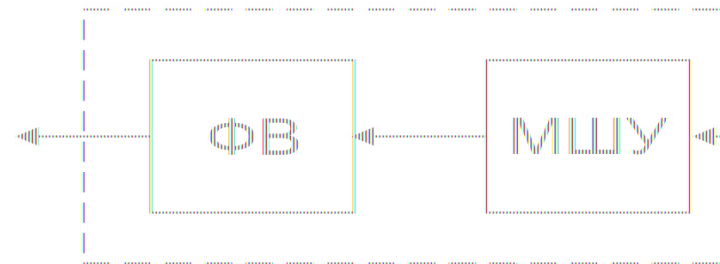
# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПЕРЕДАТЧИКА ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ (ССС)



# ПРИЕМНЫЙ И ПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛИ АФАР



а)



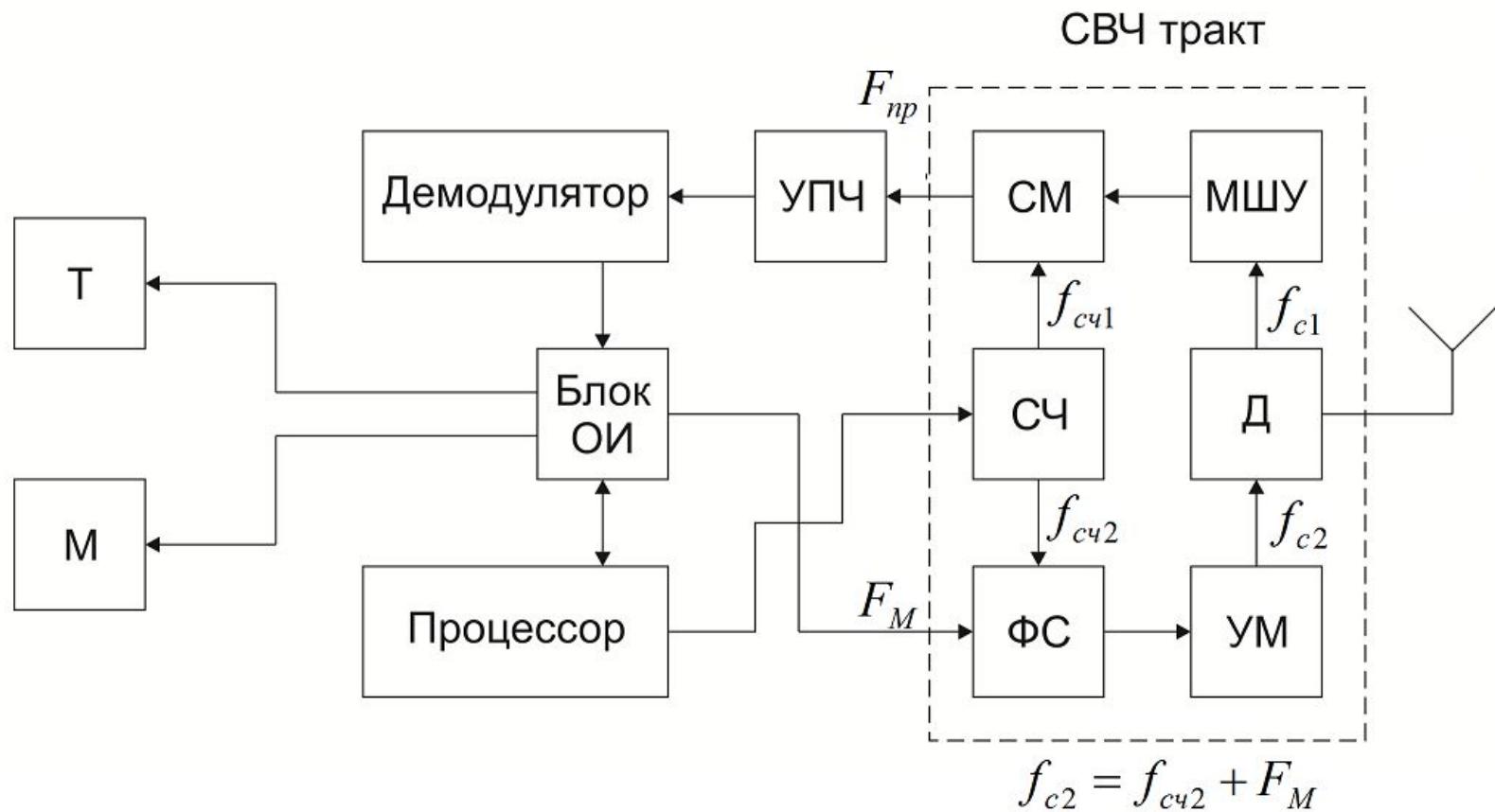
б)

а) передающий модуль

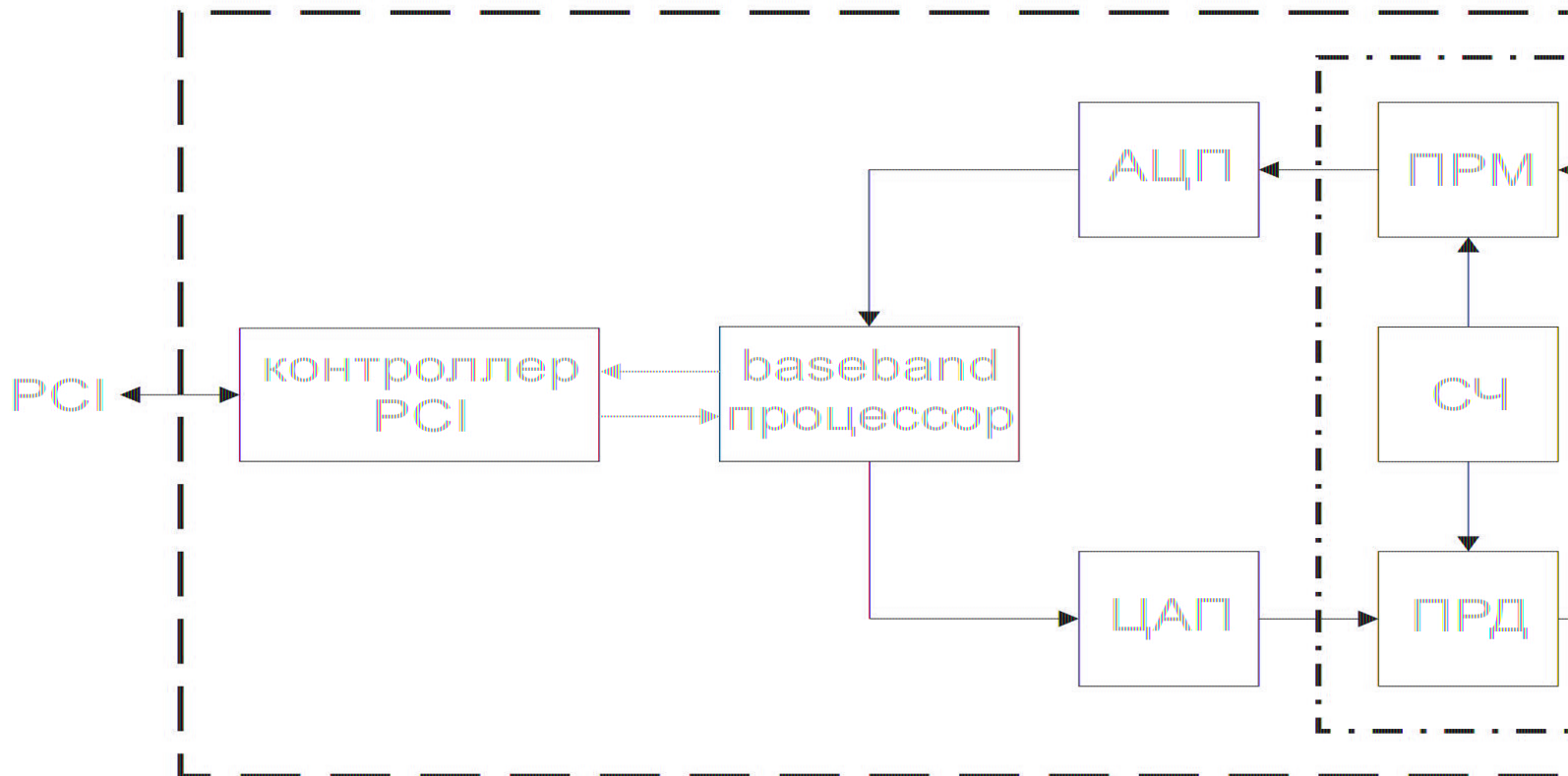
б) приёмный модуль



# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПЕРЕДВИЖНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ



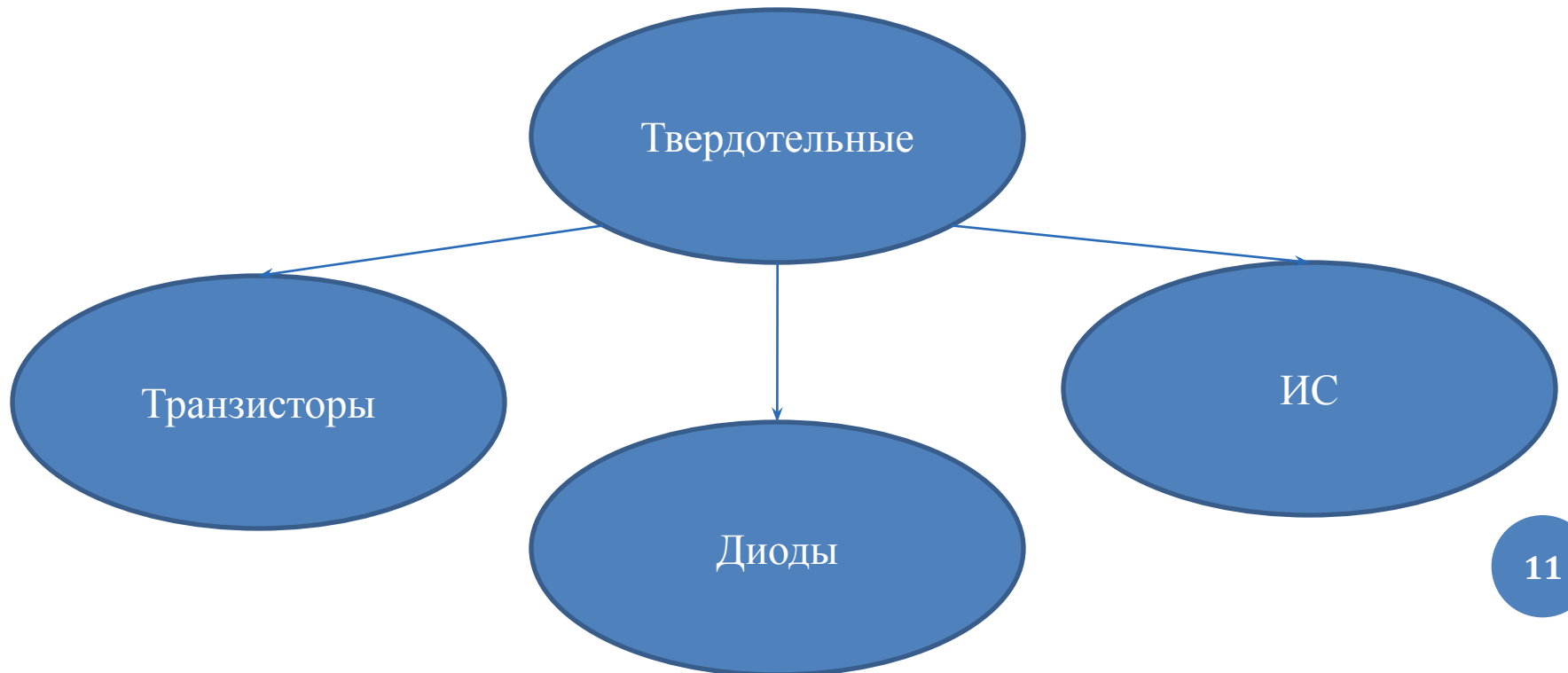
# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АДАПТЕРА WI-FI



# КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ СВЧ

По типу активной среды:

- вакуумные
- твердотельные



# КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

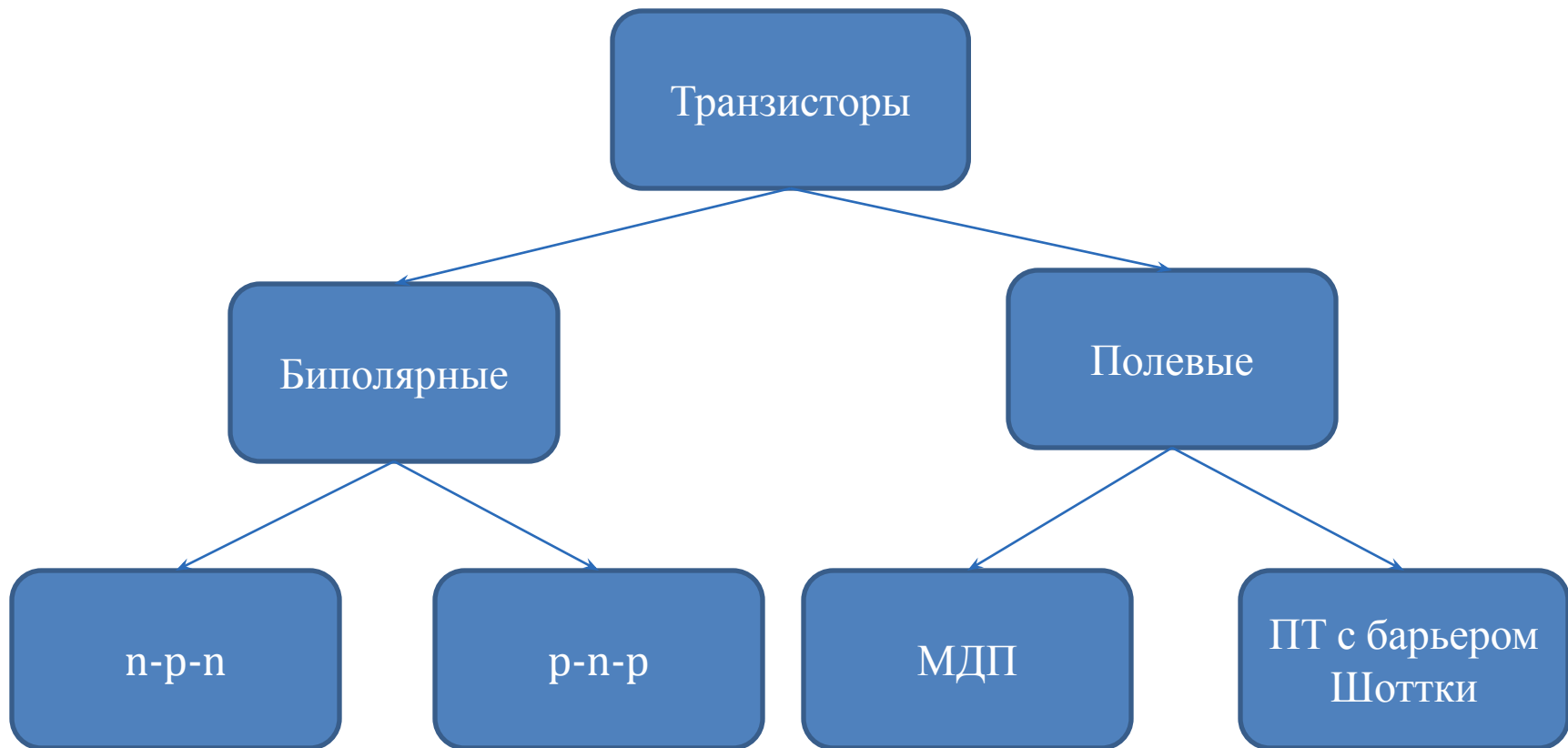
Транзистор – прибор, который служит для преобразования, усиления и генерирования сигналов

## Классификация транзисторов

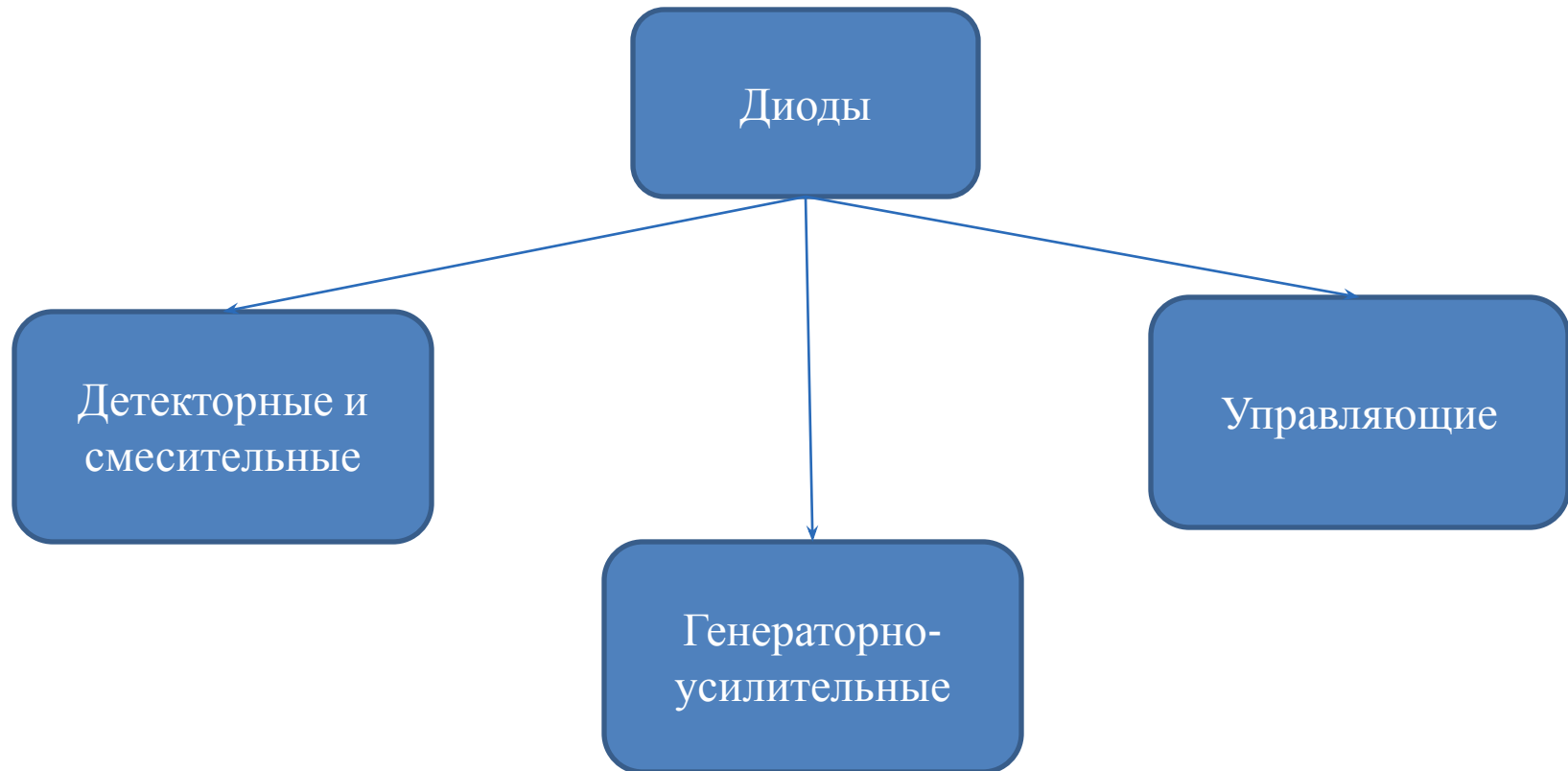
### по мощности:

- Большой мощности (10 Вт)
- Средней мощности ( $\sim 1$  Вт)
- Малой мощности ( $< 1$  Вт)

# КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНЗИСТОРОВ ПО ПРИНЦИПУ РАБОТЫ



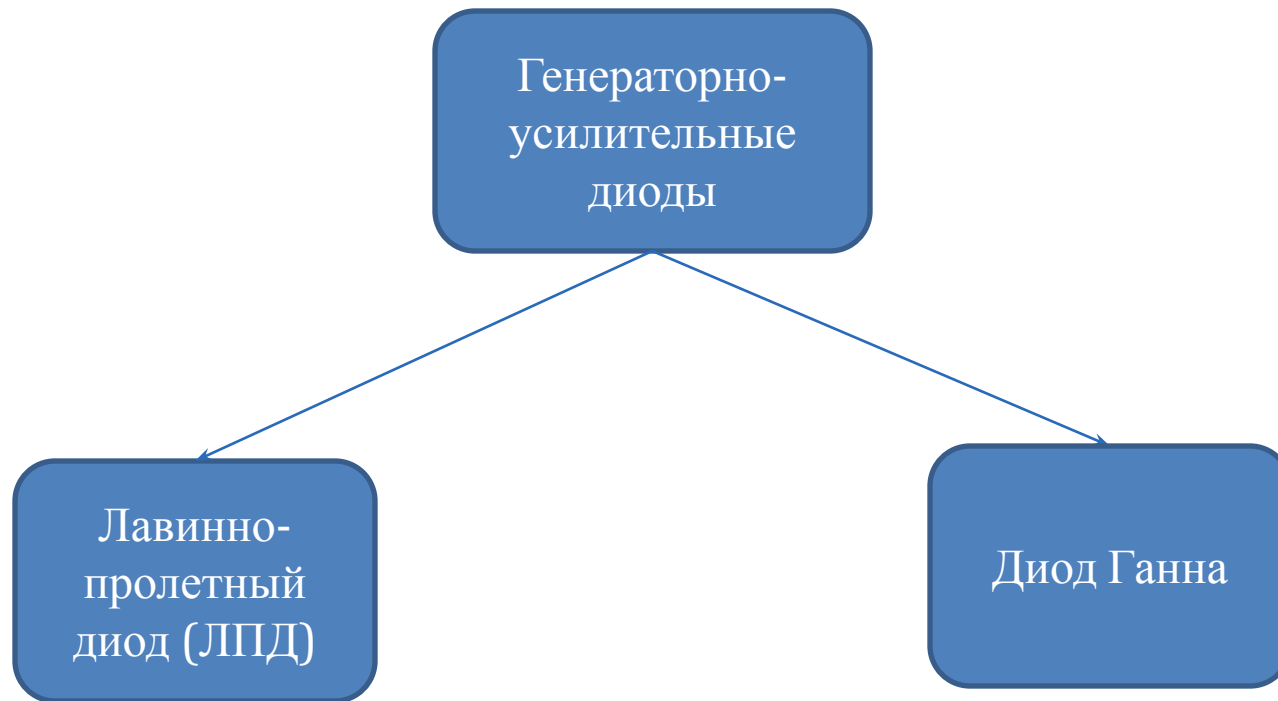
# КЛАССИФИКАЦИЯ ДИОДОВ ПО ФУНКЦИОНАЛЬНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ



# КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕТЕКТОРНЫХ И СМЕСИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

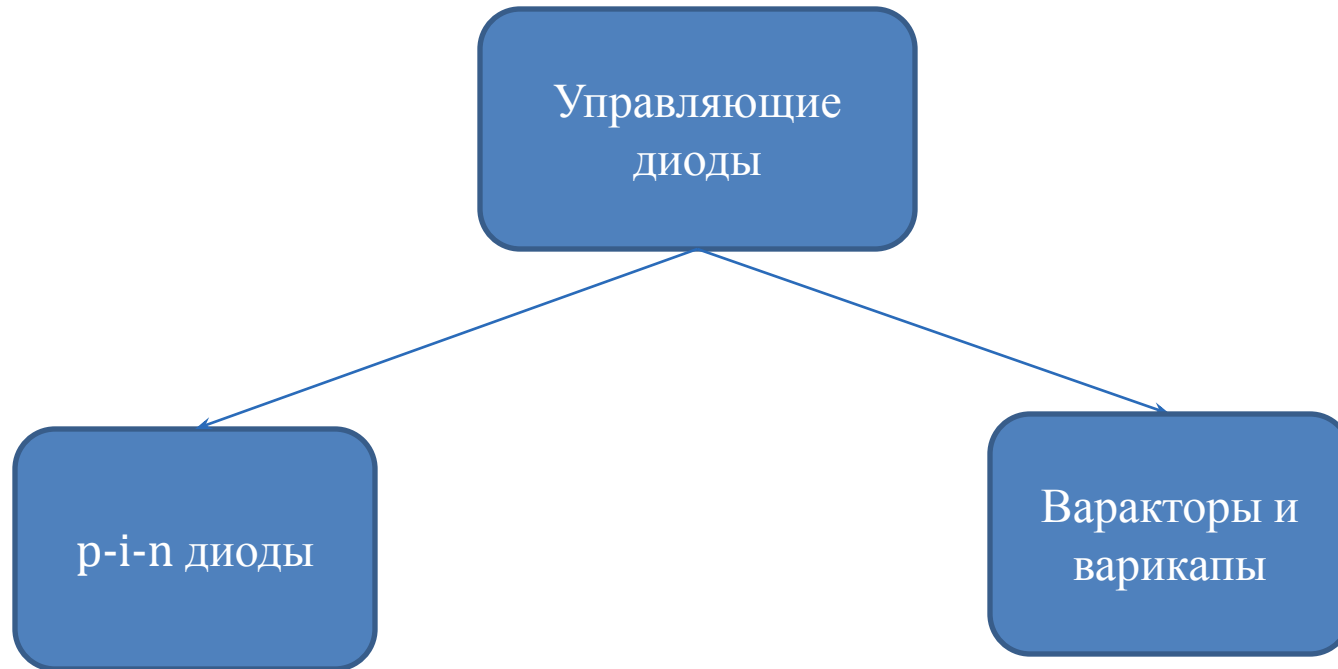


# КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕНЕРАТОРНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

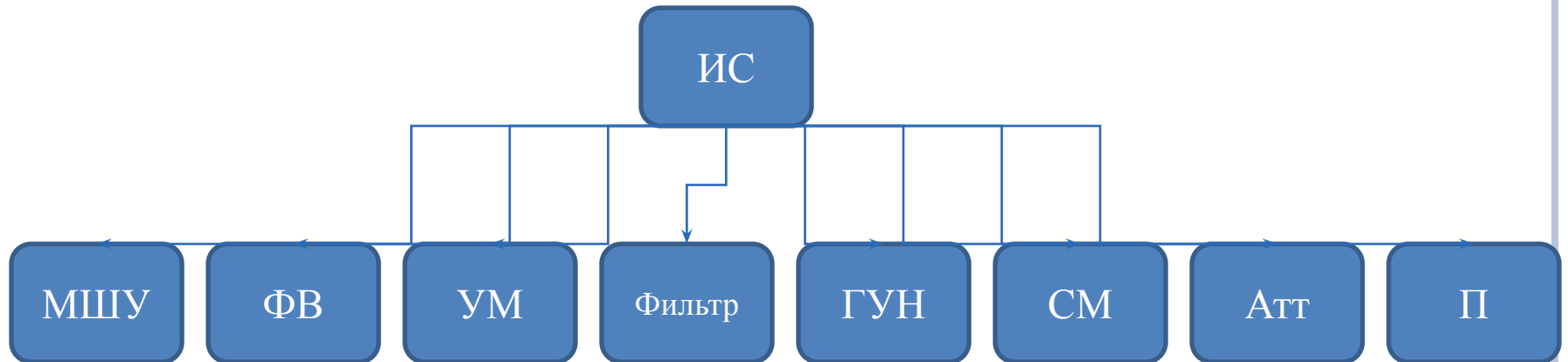




# КЛАССИФИКАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ДИОДОВ



# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ



МШУ – малошумящий усилитель

ФВ – фазовращатель

УМ – усилитель мощности

Гун – генератор, управляемый напряжением

СМ – смеситель

Атт – аттенюатор

П – переключатель

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ИС ДЛЯ Х- И К- ДИАПАЗОНОВ

ТИП ИС	Параметры	Х-диапазон	К-диапазон
УМ	Вых. мощность	7—12 Вт	2—4 Вт
	К-т усиления	6—8 дБ	5—7 дБ
	КПД	35—45%	25—35%
МШУ	К-т усиления	8—9 дБ	7—8 дБ
	К-т шума	0,8—1,5 дБ	2—2,5 дБ
ФВ	Ошибка фазы	2—4°	2—4°
	Потери	3—7 дБ	3—7 дБ
АтТ	Диапазон регулировки	32—64 дБ	32—64 дБ

# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

## Электривакуумные приборы:

- По характеру энергообмена
  - Типа О (преобразование кинетической энергии электронов в энергию СВЧ поля)
  - Типа М (преобразование потенциальной энергии электронов в энергию СВЧ поля)
- По продолжительности взаимодействия электронов с СВЧ полем
  - Кратковременное (клистроны)
  - Длительное (лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ))



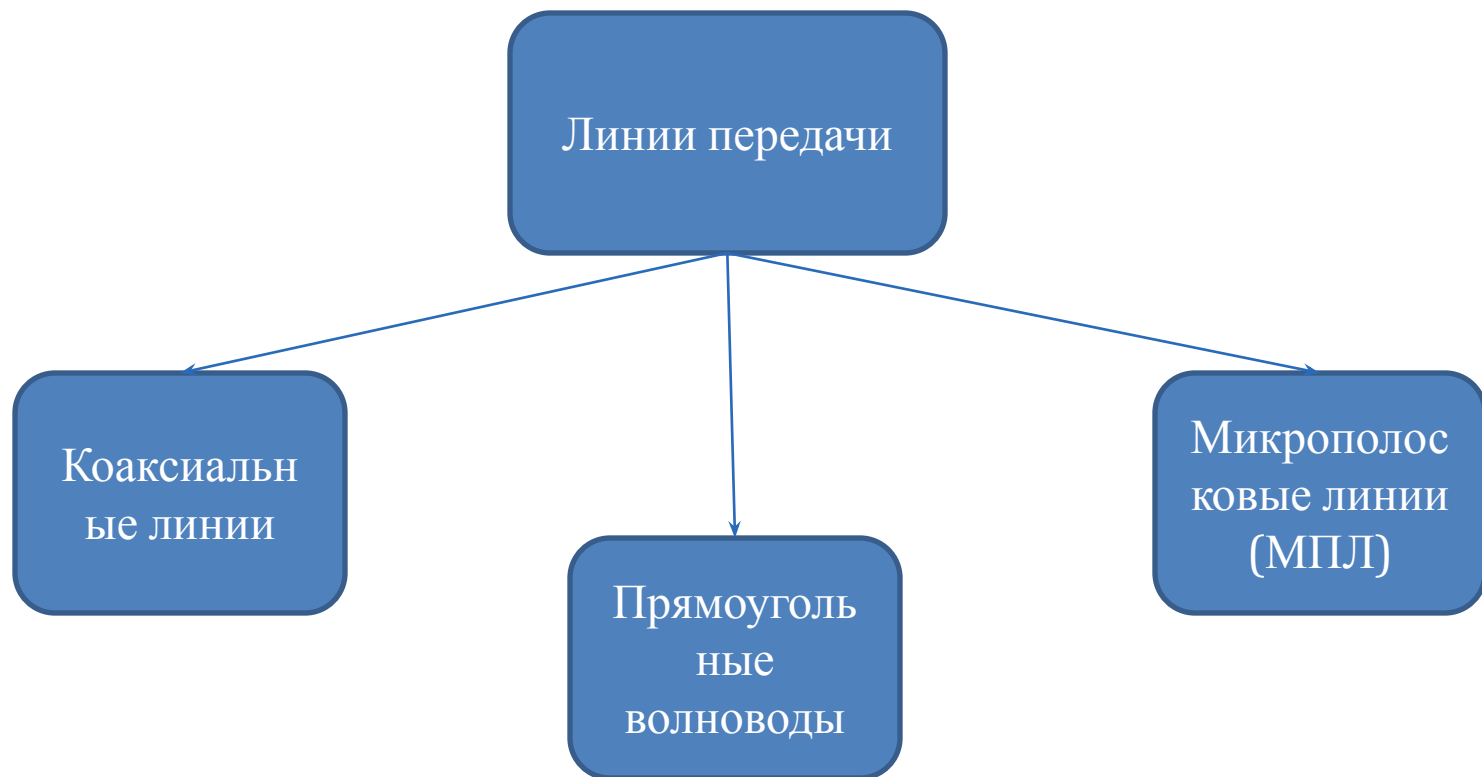
# ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ



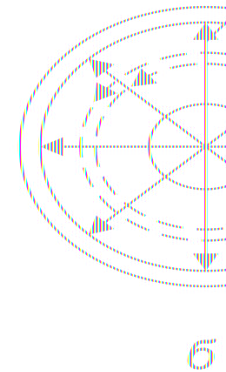
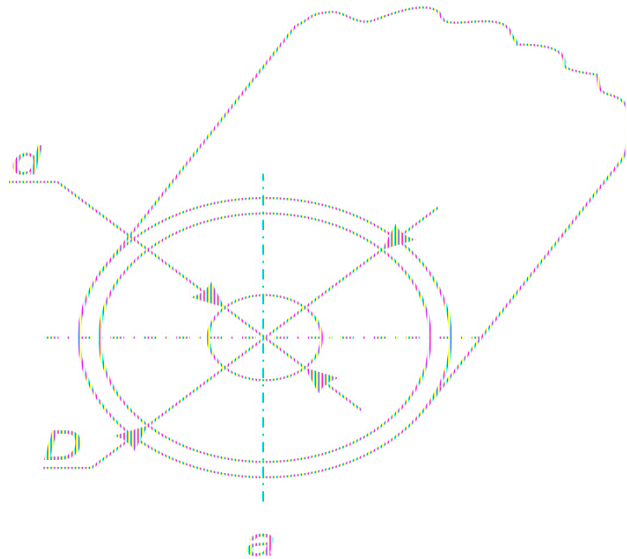
21



# ТИПЫ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ



# КОАКСИАЛЬНАЯ ЛИНИЯ



Основной тип волны - **ТЕМ**

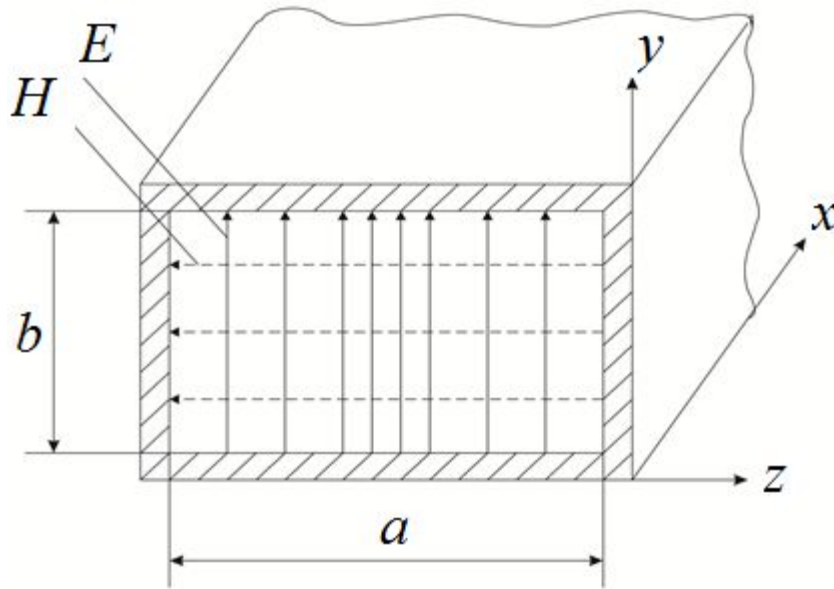
Волновое сопротивление:

$$\rho_B = 60 \ln \left( \frac{D}{d} \right) / \varepsilon^{1/2}$$

Длина волны:

$$\lambda_L = \lambda_0 / \varepsilon^{1/2}$$

# ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД



Структура поля для  
волны основного  
типа  $H_{10}$

Волновое сопротивление:

$$\rho_B = \frac{120\pi b}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}$$

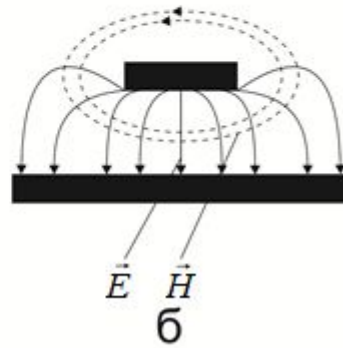
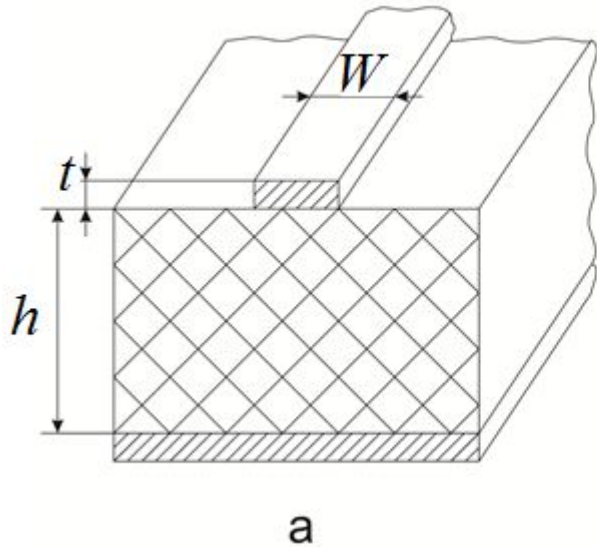
Длина волны:  $\lambda_{Л} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}}$

**Критическая длина волны:**  $\lambda_{кр} = 2a$

*Волна не распространяется по волноводу, если ее длина больше критической*



# НЕСИММЕТРИЧНАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ



**ОСНОВНОЙ ТИП  
ВОЛНЫ – КВАЗИ ТЕМ**

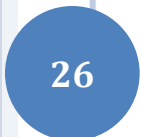
Длина волны:  $\lambda_L = \lambda_0 / \varepsilon_{эфф}^{1/2}$

$$\varepsilon_{эфф} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2\sqrt{1 + 10\frac{h}{W}}}$$

С ростом частоты изменяется  $\varepsilon_{эфф}$ . Такое явление называют **дисперсией**.



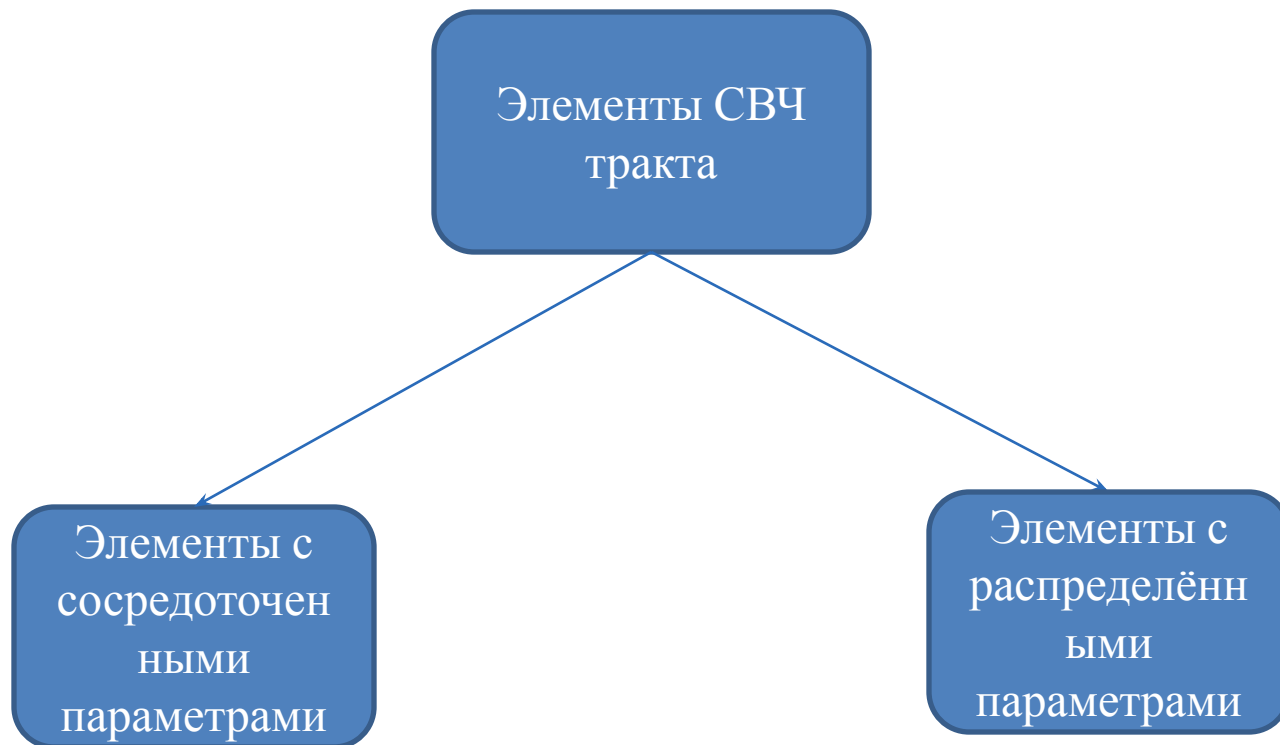
# ЭЛЕМЕНТЫ СВЧ ТРАКТА



26



# КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕМЕНТЕ



# ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Элементы с сосредоточенными параметрами:

- характерно наличие пространственного разделения электрического и магнитного полей
- Размеры элементов много меньше длины волны  $l_э \ll \lambda$

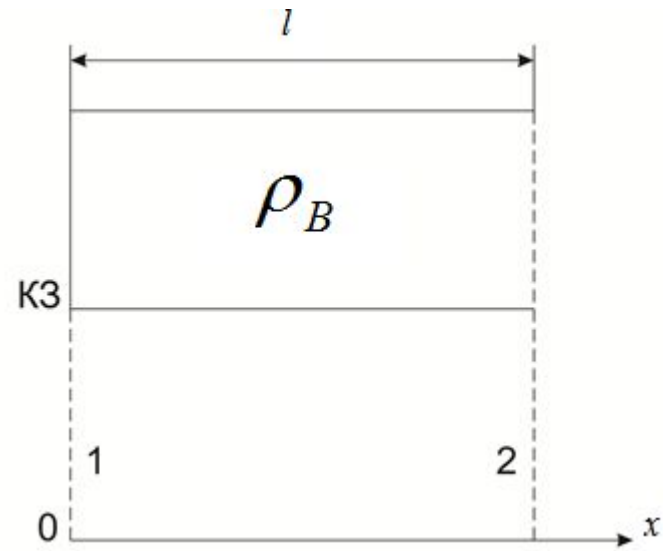
Элементы с распределёнными параметрами:

- характерно отсутствие пространственного разделения электрического и магнитного полей, то есть в любой точке может присутствовать электрическое и магнитное поле
- Размеры элементов соизмеримы с длиной волны  $l_э \geq \lambda$

# ПАРАМЕТРАМИ (РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ)

Режим К.З.:

$$\underline{U}_{вх.КЗ.} = j\rho_B \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda_B}$$



# ЭЛЕМЕНТЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ (РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ)

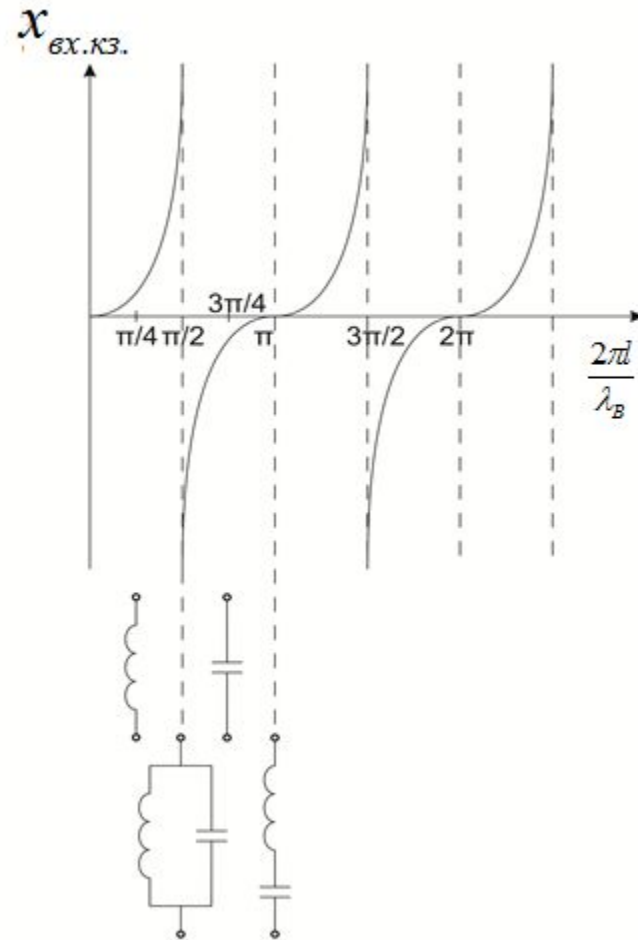
Режим К.З.:

$$x_{вх.кз.} = \rho_B \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda_B}$$

Расчет индуктивности

$$\omega L = \rho_B \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda_B}$$

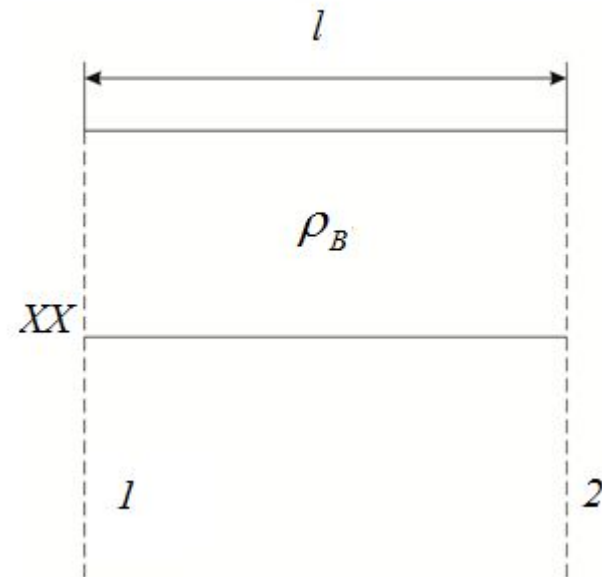
$$L = \frac{\rho_B \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda_B}}{\omega}$$



# ПАРАМЕТРАМИ (РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА)

Режим Х.Х.:

$$Z_{вх.х.х.} = -j\rho_B \operatorname{ctg} \frac{2\pi l}{\lambda_B}$$



# ПАРАМЕТРАМИ (РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА)

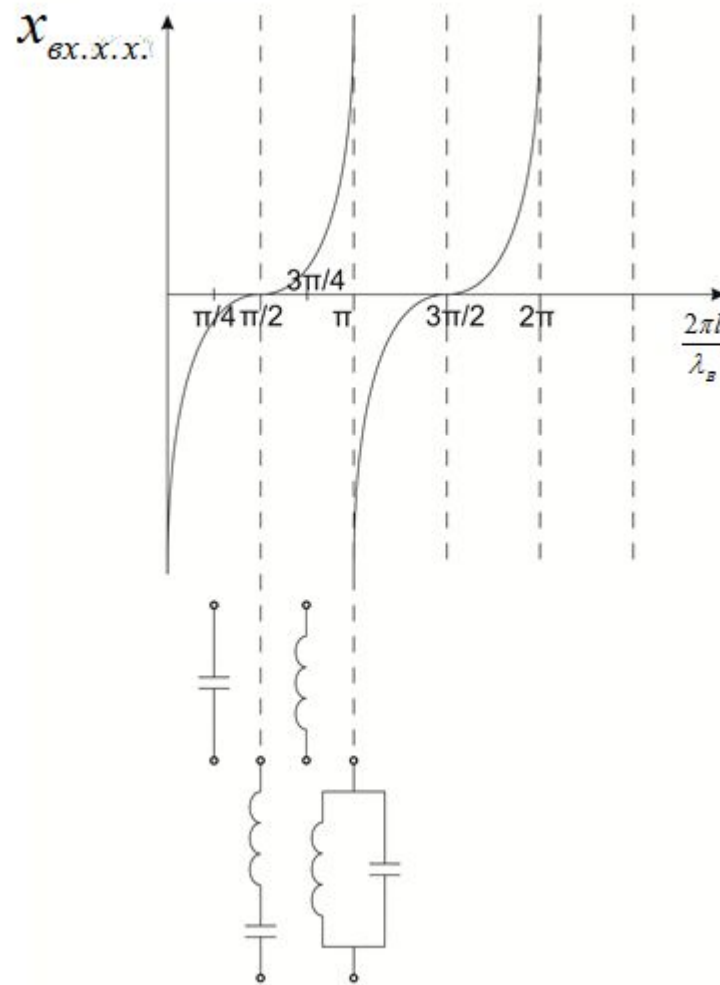
Режим Х.Х.:

$$x_{\text{вх.Х.Х.}} = -\rho_B \text{ctg} \frac{2\pi l}{\lambda_B}$$

Расчет емкости:

$$\frac{1}{\omega C} = \rho_B \text{ctg} \frac{2\pi l}{\lambda_B}$$

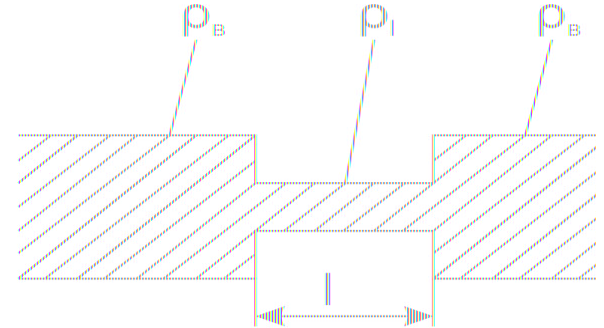
$$C = \frac{1}{\omega \rho_B \text{ctg} \frac{2\pi l}{\lambda_B}}$$



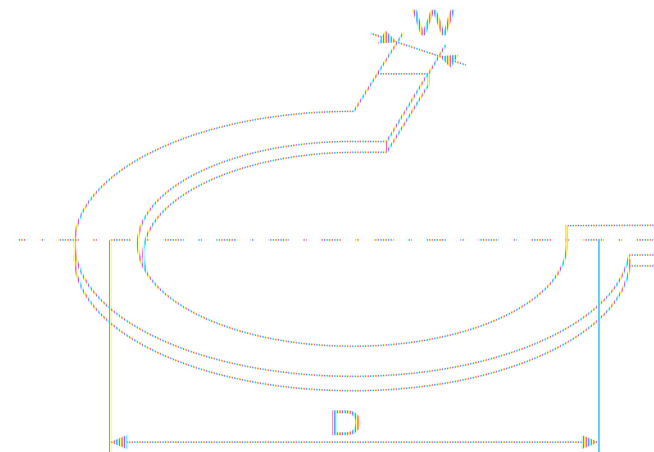


# ЭЛЕМЕНТЫ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

1. Высокоомный отрезок линии:

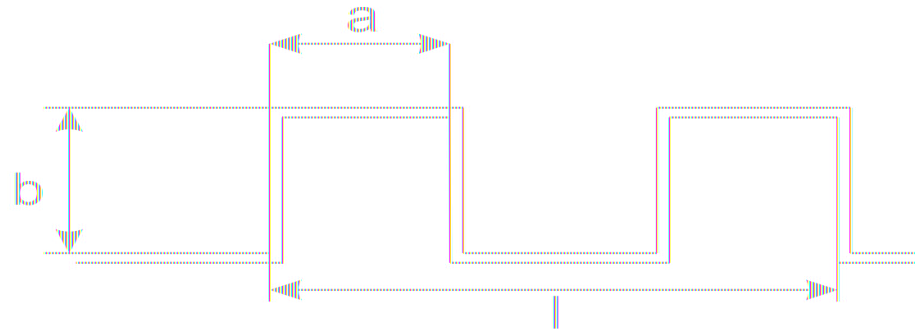


2. Одновитковая катушка:

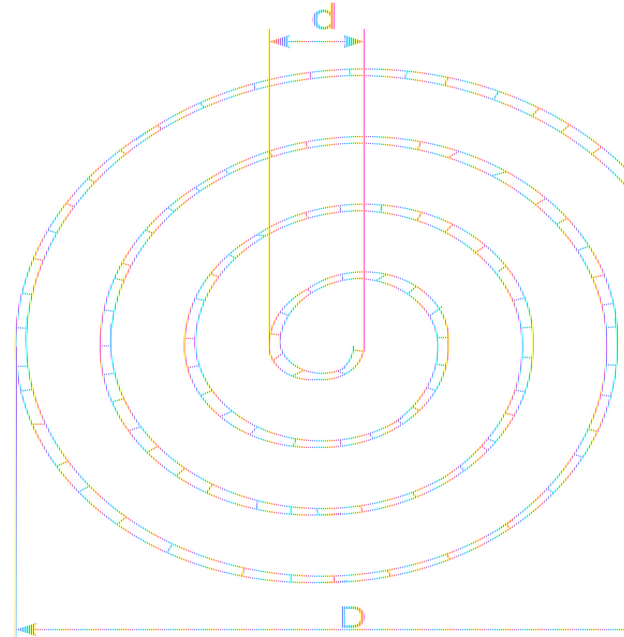


# ЭЛЕМЕНТЫ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

3. Меандр:



4. Спираль:

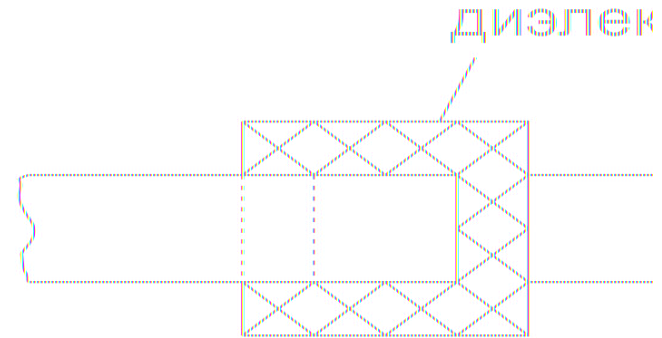


# ЭЛЕМЕНТЫ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

5. Пластинчатая ёмкость:

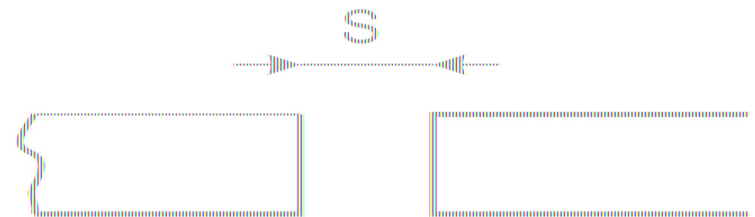
$$C \approx \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d}$$

где  $S$  – площадь перекрытия пластин,  $d$  – толщина диэлектрика.



6. Зазор:

$$C \leq 4n\Phi$$



# ЭЛЕМЕНТЫ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

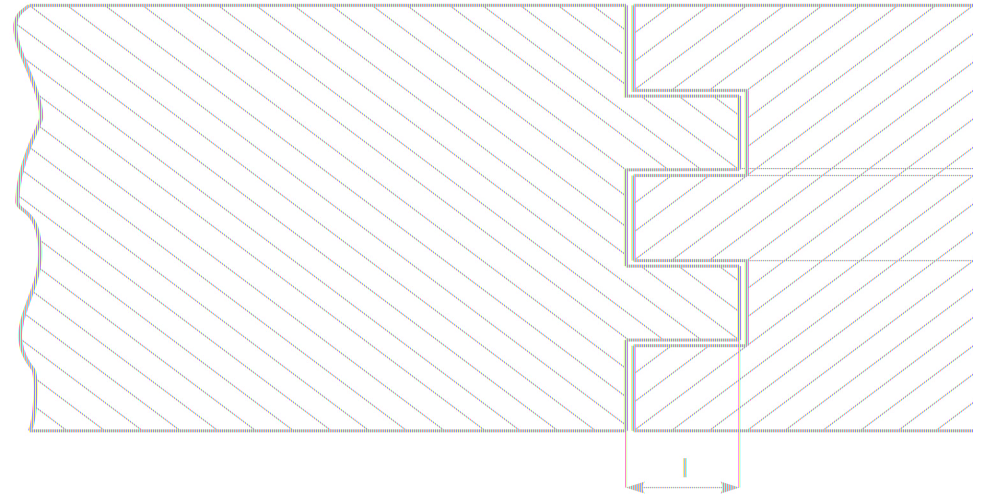
## 7. Гребенчатая емкость:

$$C = (\varepsilon + 1)\varepsilon_0 \cdot l [2A_1(N - 1) + A_2]$$

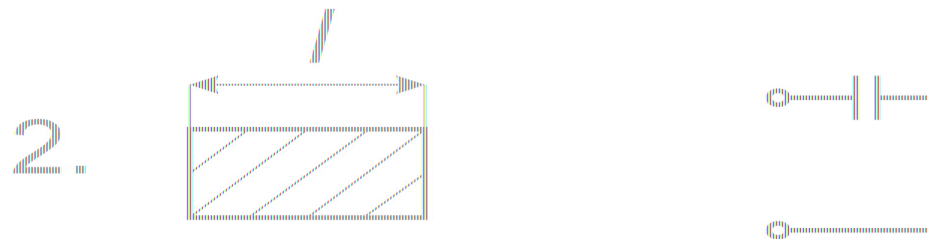
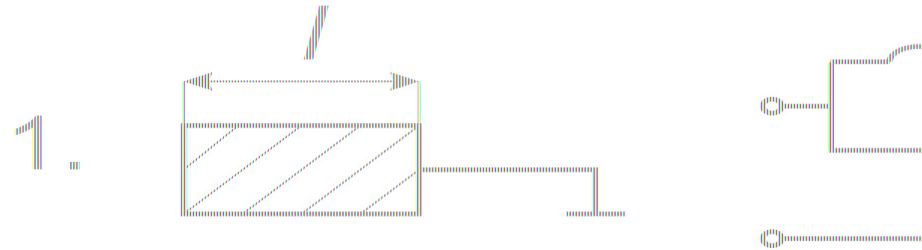
$$A_1 = 0.614 \left(\frac{h}{s}\right)^{0.25} \left(\frac{t}{h}\right)^{0.439}$$

$$A_2 = \frac{0.775t}{(2N - 1)(t + s)} + 0.408$$

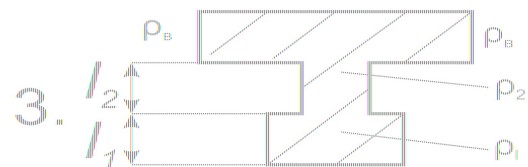
где  $N$  – число секций,  $h$  – толщина подложки,  $C$  – в пФ/ед. длины.



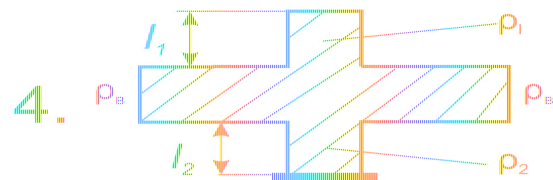
# МИКРОПОЛОСКОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ



# МИКРОПОЛОСКОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ



$$C \approx \frac{33,3}{\rho_1} l_1 \sqrt{\epsilon}$$

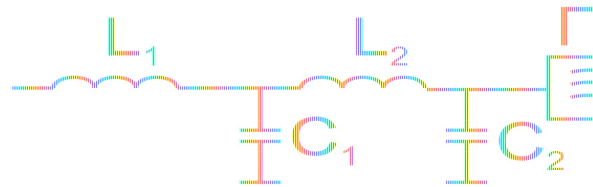


$$L = \frac{\rho_2}{30} l_2 \sqrt{\epsilon}$$

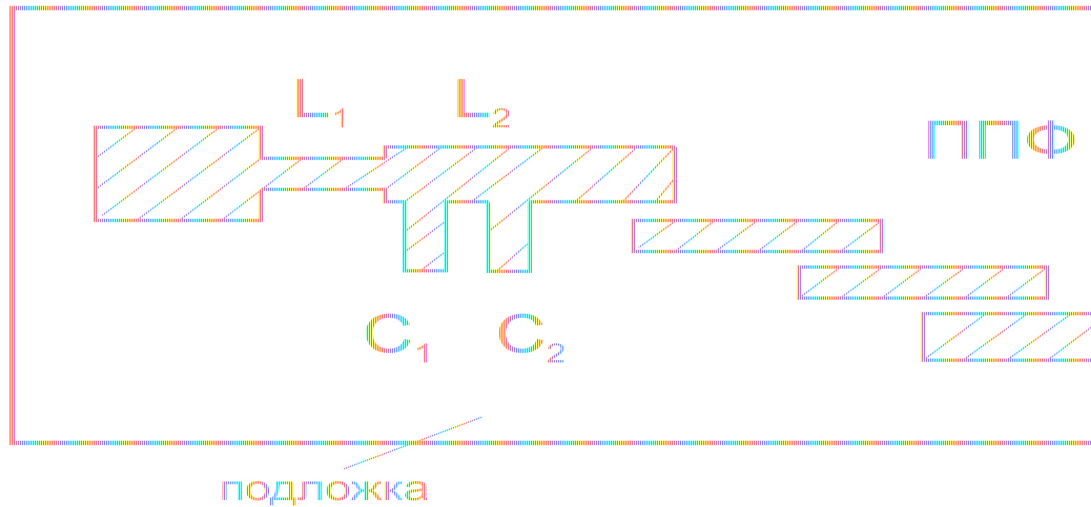
С – в пФ, L – в нГн, l – в см, ρ – в Ом

# СВЧ СХЕМА

Принципиальная схема:



Топология схемы





# ТРАНЗИСТОРЫ СВЧ ДИАПАЗОНА

40



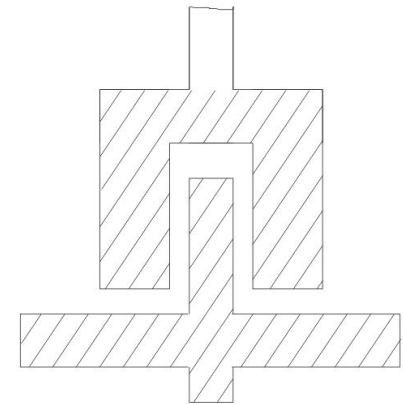
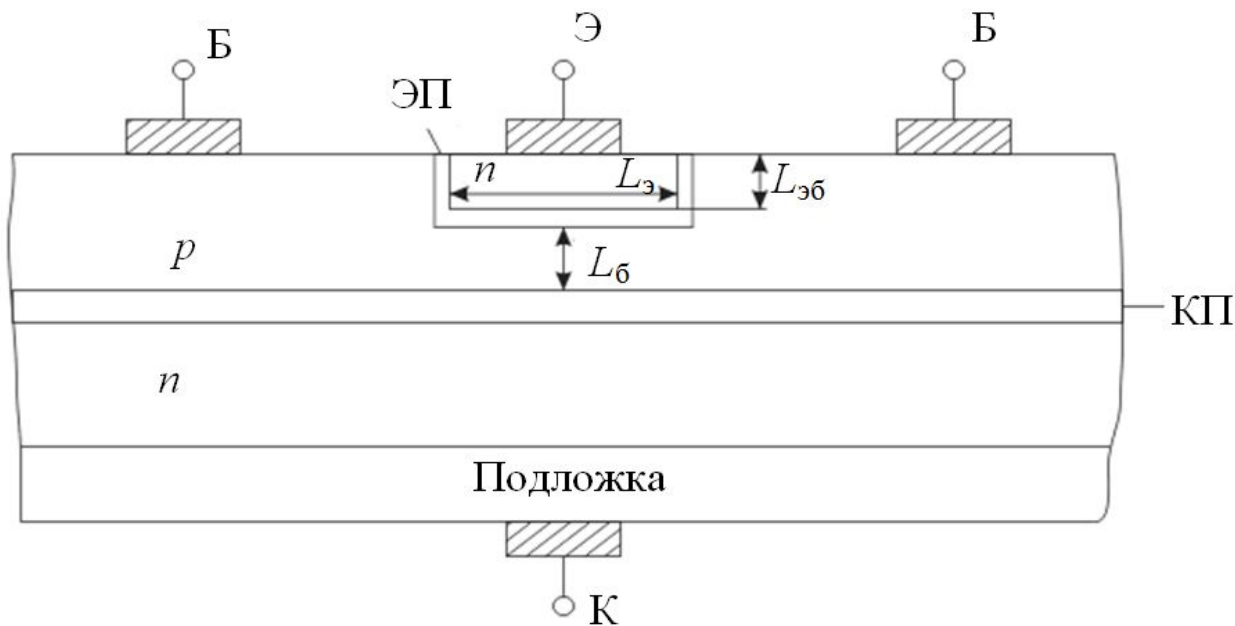
# ТЕ ЖЕ ПРИНЦИПЫ, ЧТО И В РАБОТЕ НЧ ТРАНЗИСТОРОВ

## ОСОБЕННОСТИ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

1. Ограничение рабочей частоты транзистора временем переноса носителей через транзистор
2. Ограничение рабочей частоты транзистора, обусловленное скоростью изменения заряда, накопленного в транзисторе
3. Влияние на рабочую частоту транзистора конструкции выводов транзистора и их паразитных параметров

# СТРУКТУРА БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

**БИПОЛЯРНЫМ** НАЗЫВАЮТ ТРАНЗИСТОР, В  
КОТОРОМ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ЗАРЯДЫ  
НОСИТЕЛЕЙ ОБЕИХ ПОЛЯРНОСТЕЙ



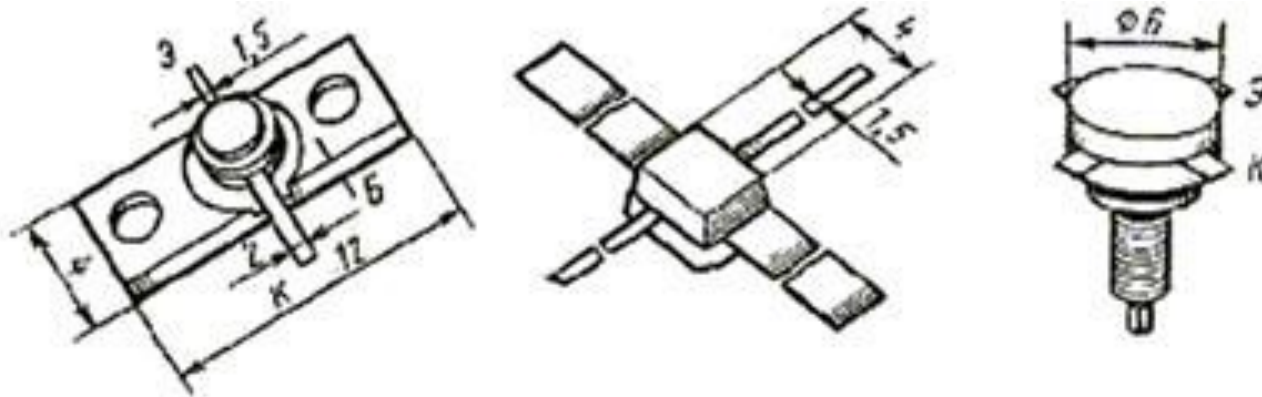
СВЧ биполярные транзисторы отличаются от низкочастотных прежде всего размерами активных областей, которые характеризуются шириной эмиттерной полоски  $l_э$  и толщиной базы  $l_б$ .

Современная технология позволяет получить эмиттерные полоски шириной  $l_э$  меньше 0,1 мкм и толщину базы  $l_б$  несколько десятков нанометров.

***Наличие сверхтонкой базы является одной из особенностей транзисторов СВЧ.***

Для более мощных СВЧ-транзисторов используется объединение в одном кристалле большого числа единичных структур (до 150).

Особенности СВЧ-транзисторов с точки зрения конструкции выводов эмиттера, коллектора и базы состоят в том, что выводы делают в виде коротких полосок, удобных для сочленения с микрополосковыми линиями передачи. Такая геометрия выводов наиболее полно отвечает требованиям уменьшения их «паразитных» емкостей и индуктивностей.



# РАСЧЕТ ГРАНИЧНОЙ ЧАСТОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi\tau_{\text{ЭК}}}$$

где  $\tau_{\text{ЭК}}$  - время задержки сигнала в транзисторе

$$\tau_{\text{ЭК}} = \tau_{\text{Э}} + \tau_{\text{К}} + \tau_{\text{Б}} + \tau_{\text{ЭБ}} + \tau_{\text{БК}}$$

$\tau_{\text{Э}}$  – время накопления неосновных носителей в эмиттере,

$\tau_{\text{К}}$  – время задержки носителей в обедненной области коллектора,

$\tau_{\text{Б}}$  – время пролета неосновных носителей через базу,

$\tau_{\text{ЭБ}}$  – время заряда емкости эмиттерного перехода,

$\tau_{\text{БК}}$  – время заряда емкости коллекторного перехода

# ВРЕМЯ НАКОПЛЕНИЯ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В ЭМИТТЕРЕ

$$\tau_{\varepsilon} = \frac{l_{\varepsilon\delta}^2}{2D_{p\varepsilon}\beta_0}$$

где  $l_{\varepsilon\delta}$  - расстояние от поверхности транзистора до металлургической границы эмиттерного перехода,

$D_{p\varepsilon}$  - коэффициент диффузии дырок в эмиттере,

$\beta_0$  - коэффициент усиления по постоянному току

# ВРЕМЯ ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ В ОБЕДНЕННОЙ ОБЛАСТИ КОЛЛЕКТОРА

$$\tau_{\kappa} = \frac{l_{\kappa}}{2v_s}$$

где  $l_{\kappa}$  – ширина обедненной области коллектора

$v_s$  - скорость насыщения носителей

# ВРЕМЯ ПРОЛЕТА НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЧЕРЕЗ БАЗУ

$$\tau_{\bar{b}} = \frac{l_{\bar{b}}^2}{nD_{n\bar{b}}}$$

где  $l_{\bar{b}}$  – толщина базы,

$n$  – коэффициент, зависящий от распределения примесей в базе,

$D_{n\bar{b}}$  - коэффициент диффузии электронов в базе



# ВРЕМЯ ЗАРЯДА ЕМКОСТИ ЭМИТТЕРНОГО ПЕРЕХОДА

$$\tau_{эб} = R_{\beta} C_{\varepsilon}$$

где  $R_{\beta}$  – сопротивление рекомбинации

$$R_{\beta} = \frac{\varphi_T}{I_{\varepsilon}} \quad \varphi_T = \frac{kT}{e}$$

# ВРЕМЯ ЗАРЯДА ЕМКОСТИ КОЛЛЕКТОРНОГО ПЕРЕХОДА

$$\tau_{\bar{b}k} = C_k (r_{\bar{э}} + r_k)$$

где  $r_{\bar{э}}$ ,  $r_k$  – сопротивления эмиттерной и коллекторной областей;

$C_k$  – емкость коллектора

# ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ ТРАНЗИСТОРА

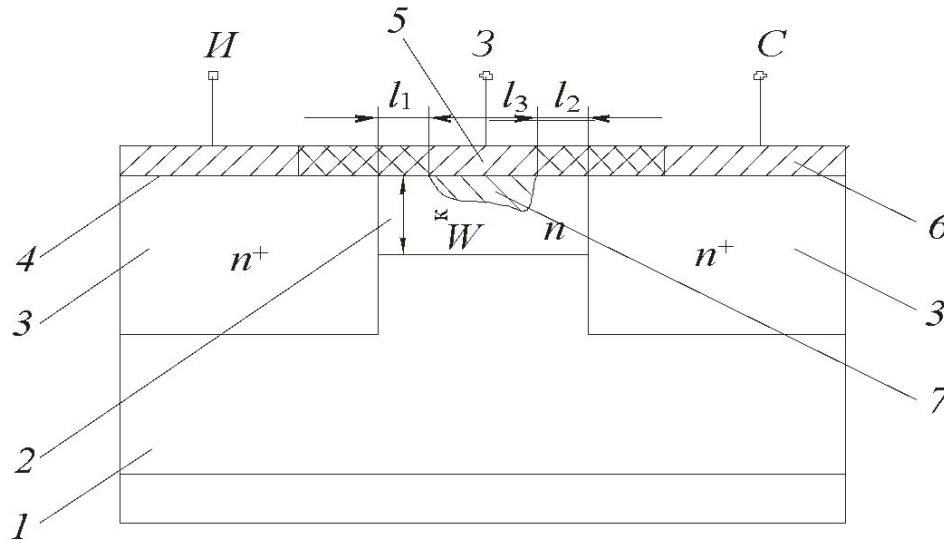
1. Уменьшение  $l_k$  ;
2. Уменьшение  $l_b$  ;
3. Уменьшение  $C_{\varepsilon}$  и  $C_k$  ;
4. Уменьшение  $r_k$

## *Примеры противоречивых требований*

Требования 1 и 3 связаны с увеличением граничной частоты. Однако уменьшение  $l_k$  приводит к росту  $C_k$

Требование 3, связанное с уменьшением  $C_{\varepsilon}$ , находится в противоречии с требованием увеличения мощности транзистора, согласно которому площадь эмиттера требуется увеличивать.

# СТРУКТУРА ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА



- 1 - высокоомная подложка, выполненной из GaAs,
- 2 -проводящий канал  $n$ -типа подсоединен к выводам истока  $I$  и стока  $C$ .
- 3- невыпрямляющие контакты, образованные  $n^+$  областями и контактами 4 и 6,
- 4 и 6 - металлические электроды
- 5 - затвор, у которого на границе с  $n$ -каналом образован барьер Шоттки.
- 7 – обедненная область

При подаче напряжения между стоком и истоком через  $n$ -канал протекает электронный ток.. Затвор 5 используется в ПТ для управления током транзистора с помощью внешнего сигнала. При протекании тока через канал возникает падение напряжения на распределенном сопротивлении канала вдоль его длины. Область обедненного слоя может расширяться до высокоомной подложки 1 и перекрывать проводящий канал. При этом ток транзистора в цепи исток - сток практически перестает зависеть от напряжения стока.

# РАСЧЕТ ГРАНИЧНОЙ ЧАСТОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

$$f_{gr} = \frac{1}{2\pi\tau_{пр}}$$

где  $\tau_{пр}$  – это время пролета носителей через канал

$$\tau_{пр} = \frac{L}{V_{нас}}$$

где  $L$  – длина канала:  $L = l_1 + l_2 + l_3$

$$L = 1,2l_3$$

**Для получения высокочастотных приборов необходимо:**

- обеспечить малую длину канала
- большую дрейфовую скорость насыщения.

Из этих условий вытекает ряд **требований к материалу транзистора и к размерам его электродов**. В качестве материала канала в ПТ используют преимущественно арсенид галлия GaAs. Это объясняется тем, что подвижность электронов в этом материале в несколько раз выше, чем в кремнии, поэтому различаются и скорости насыщения, которые составляют  $2 \cdot 10^7$  см/с для GaAs и  $0,8 \cdot 10^7$  см/с для Si. Имеются данные о создании ПТ на основе фосфида индия InP, в котором дрейфовая скорость носителей в 1,5 раза выше, чем в арсениде галлия.

Однако, сокращая  $L$ , нужно одновременно уменьшать и глубину канала  $w_k$  так, чтобы выполнялось условие  $L/w_k > 1$ , в противном случае затвор транзистора не сможет эффективно контролировать движение электронов в канале. Для уменьшения  $w_k$  используют более высокий уровень легирования канала, не превышающий, однако,  $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> (во избежание пробоя). При таком уровне легирования минимальная длина затвора ограничена значением около 0,1 мкм, что соответствует граничной частоте  $f_{гр} = 100$  ГГц.



# ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ

55



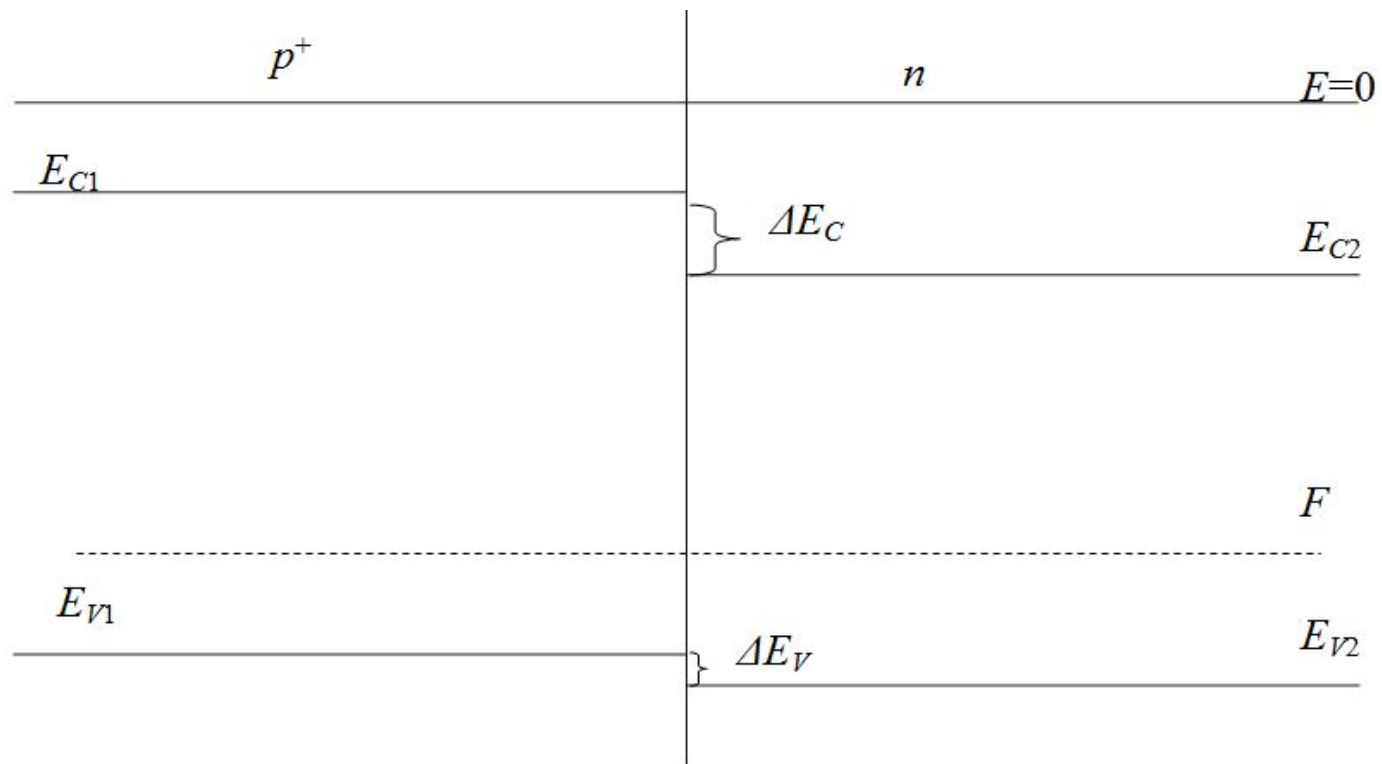
# ПОНЯТИЕ О ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ

- *Гетеропереход* образуется при контакте двух полупроводниковых кристаллов, имеющих разную ширину запрещенной зоны, одинаковую кристаллическую структуру и равные постоянные кристаллической решетки.



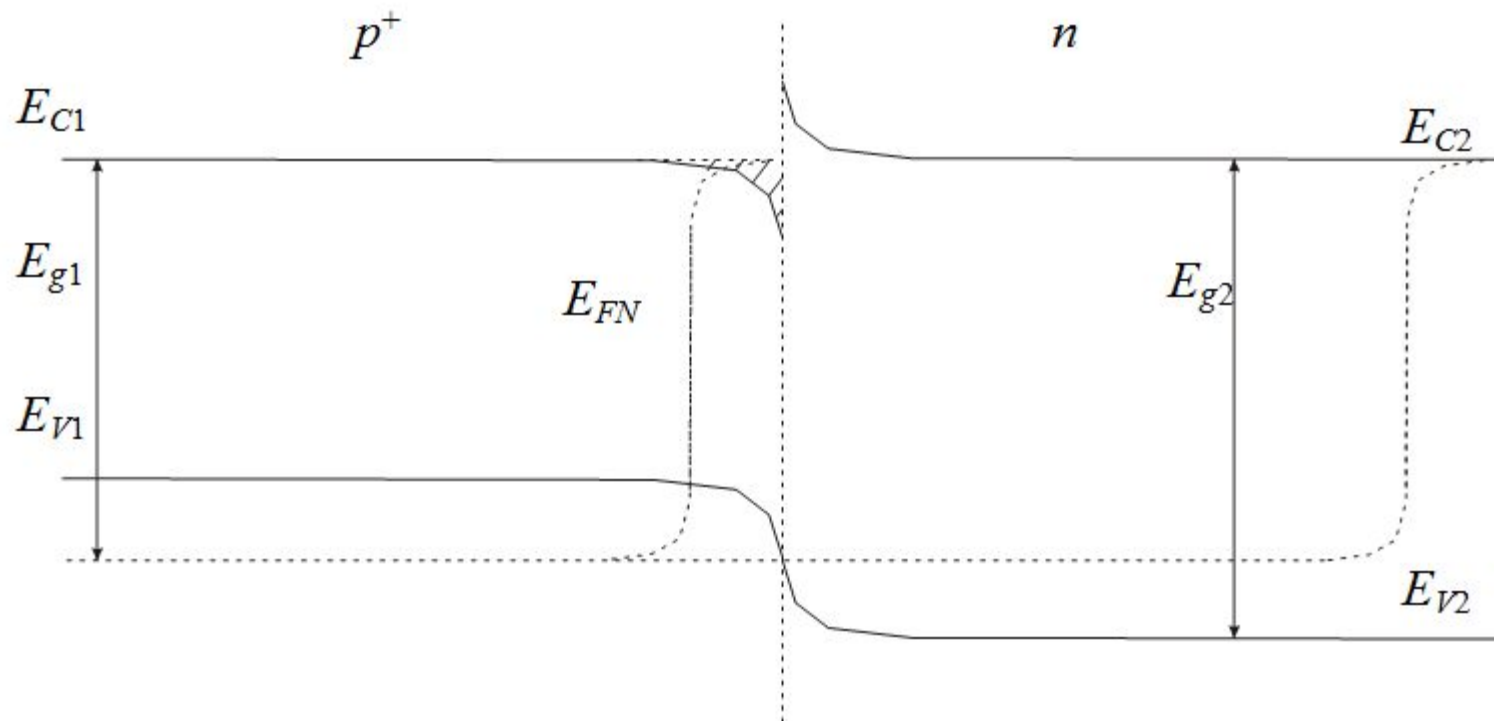
# ЗОННАЯ ДИАГРАММА ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

Особенности данной диаграммы состоят в наличии скачков  $\Delta E_c$ ,  $\Delta E_v$



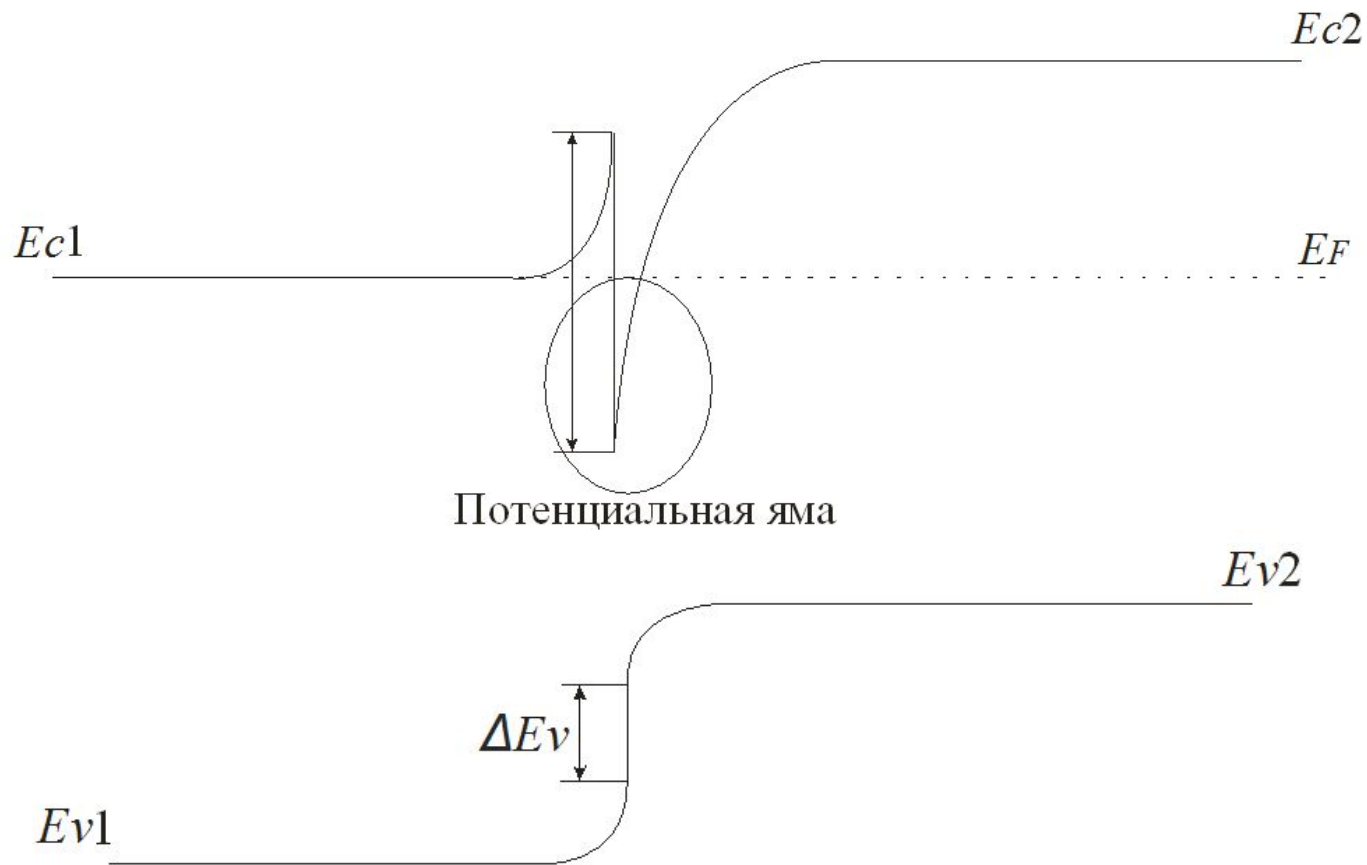
# ЯВЛЕНИЕ СВЕРХИНЖЕКЦИИ

Скачки дна зоны проводимости способствуют тому, что электронный квазиуровень ( $E_{Fn}$ ,  $E_{Fp}$ ) располагается выше уровня  $E_{C1}$

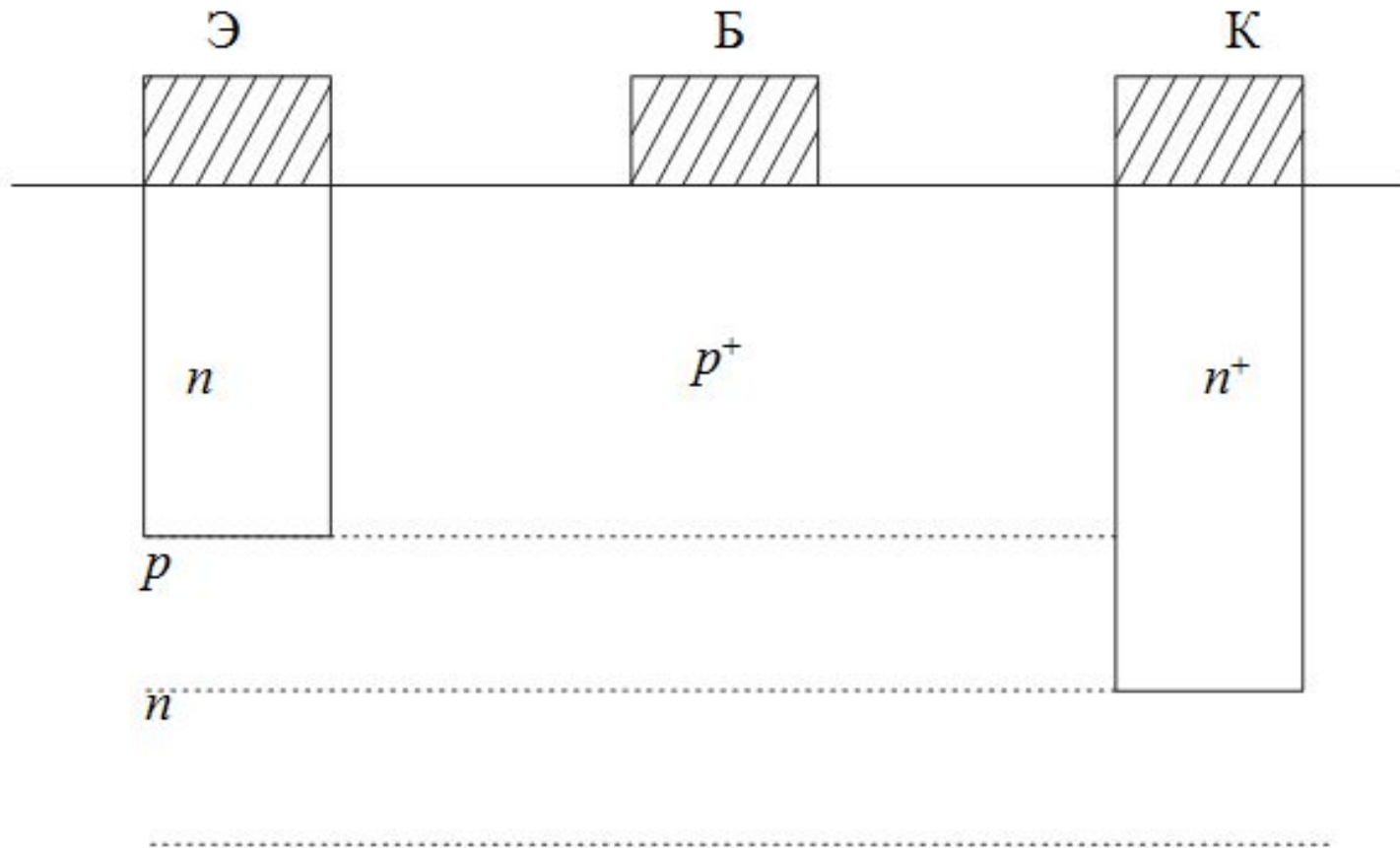


# ДВУМЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗ

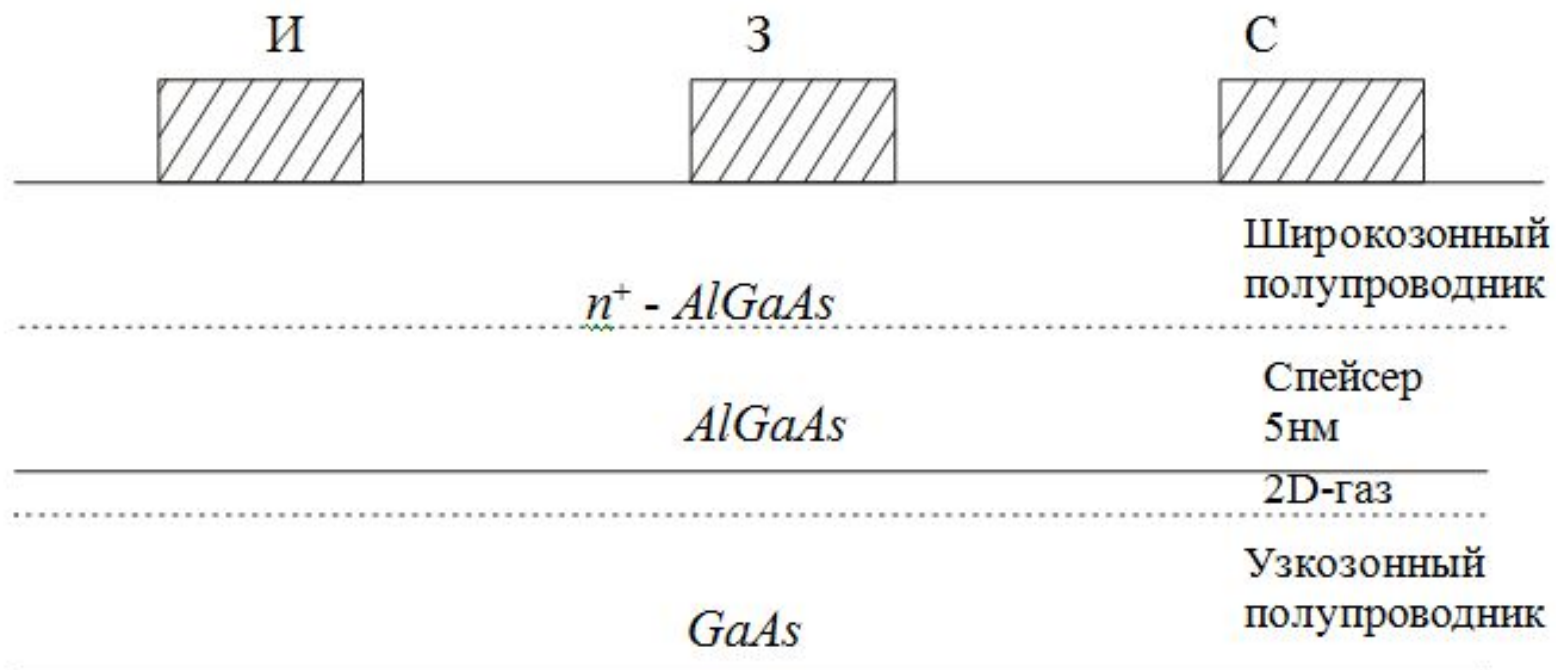
Образуется потенциальная яма, куда «сваливаются»  
электроны



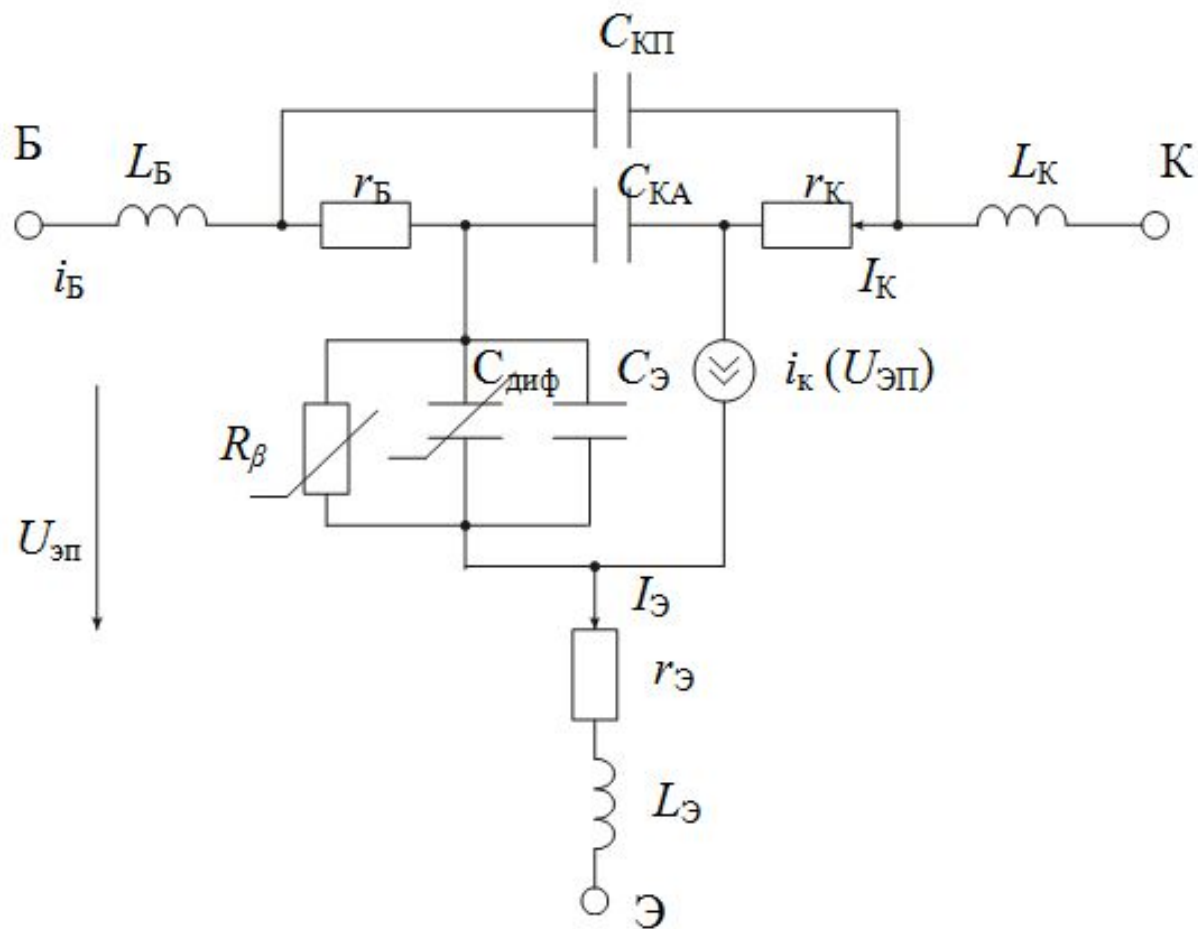
# СТРУКТУРА БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА НА ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ (НВТ)



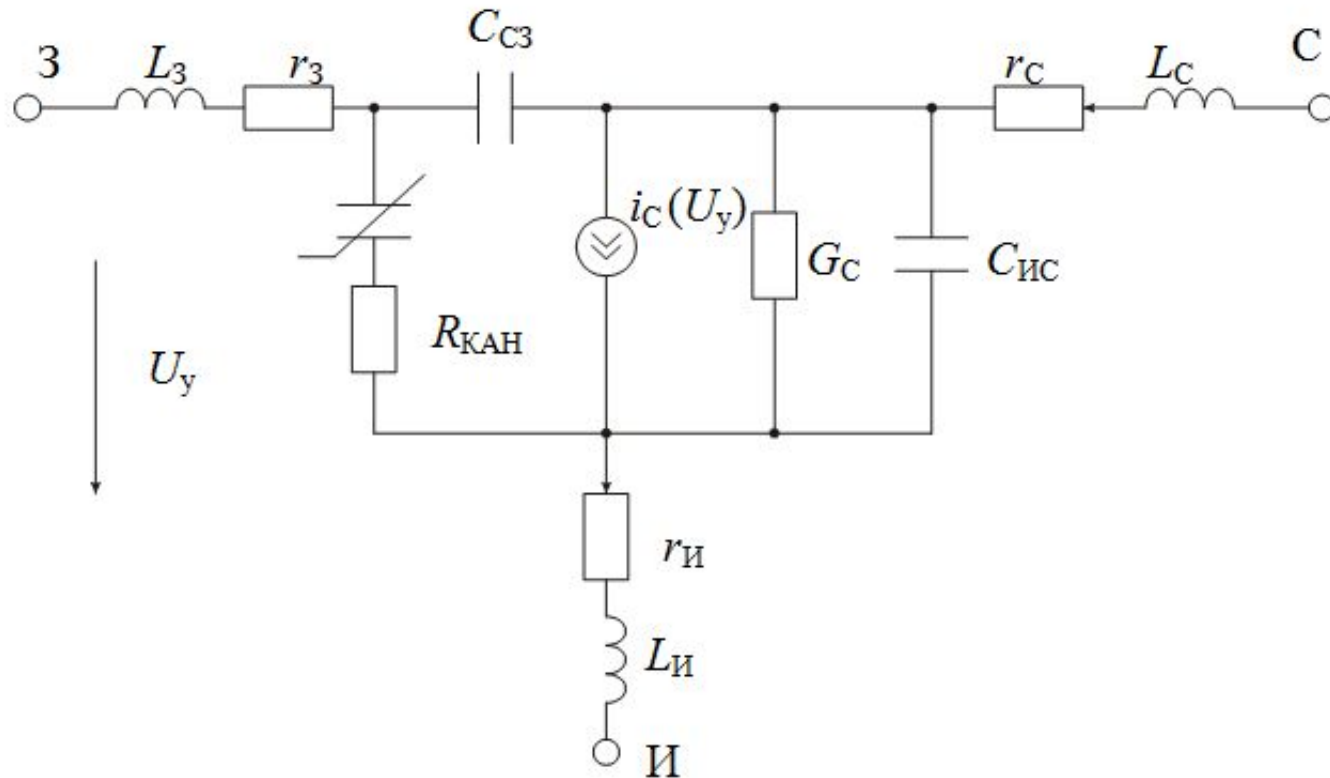
# СТРУКТУРА ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА НА ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ (HEMT)

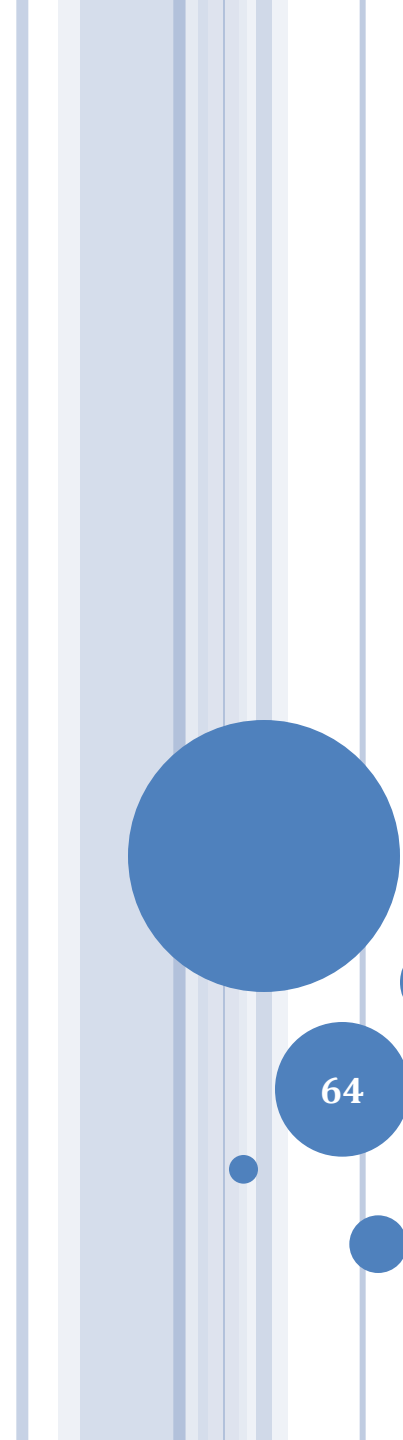


# ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА СВЧ ДИАПАЗОНА



# ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА СВЧ ДИАПАЗОНА



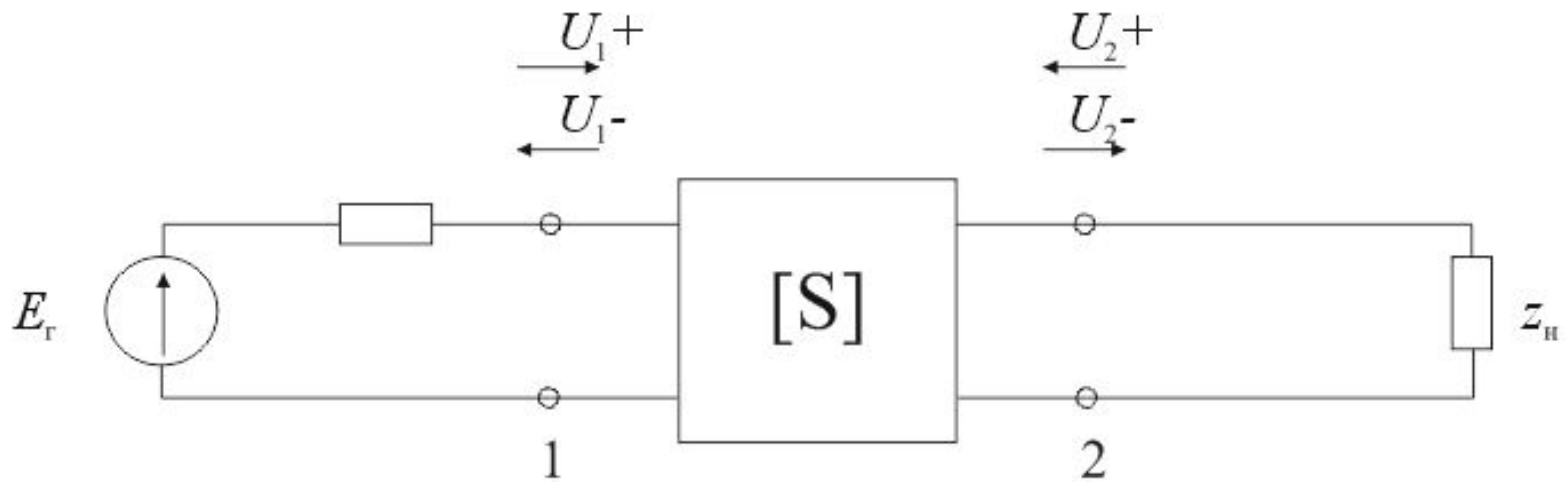


# К ОПРЕДЕЛЕНИЮ S- ПАРАМЕТРОВ ● ТРАНЗИСТОРОВ

64



# СХЕМА ЛИНЕЙНОГО УСИЛИТЕЛЯ



$$U_1^- = S_{11} U_1^+ + S_{12} U_2^+,$$

$$U_2^- = S_{21} U_1^+ + S_{22} U_2^+,$$

# S – ПАРАМЕТРЫ

$$\begin{aligned} S_{11} &= U^-_1 / U^+_1, & U^+_2 &= 0; \\ S_{22} &= U^-_2 / U^+_2, & U^+_1 &= 0; \\ S_{12} &= U^-_1 / U^+_2, & U^+_1 &= 0; \\ S_{21} &= U^-_2 / U^+_1, & U^+_2 &= 0 \end{aligned}$$