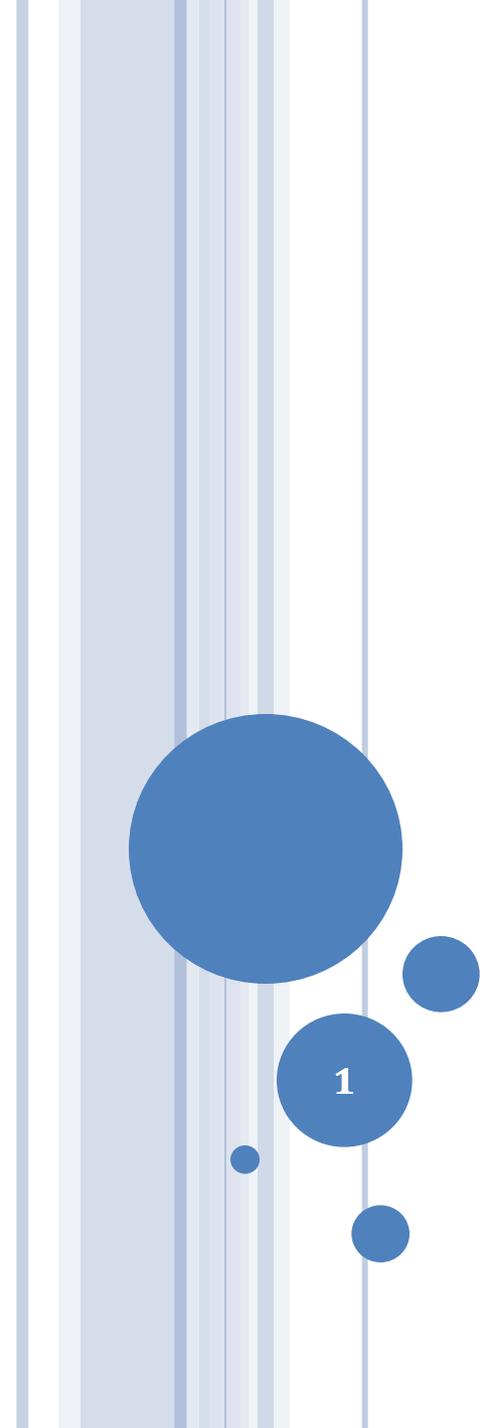


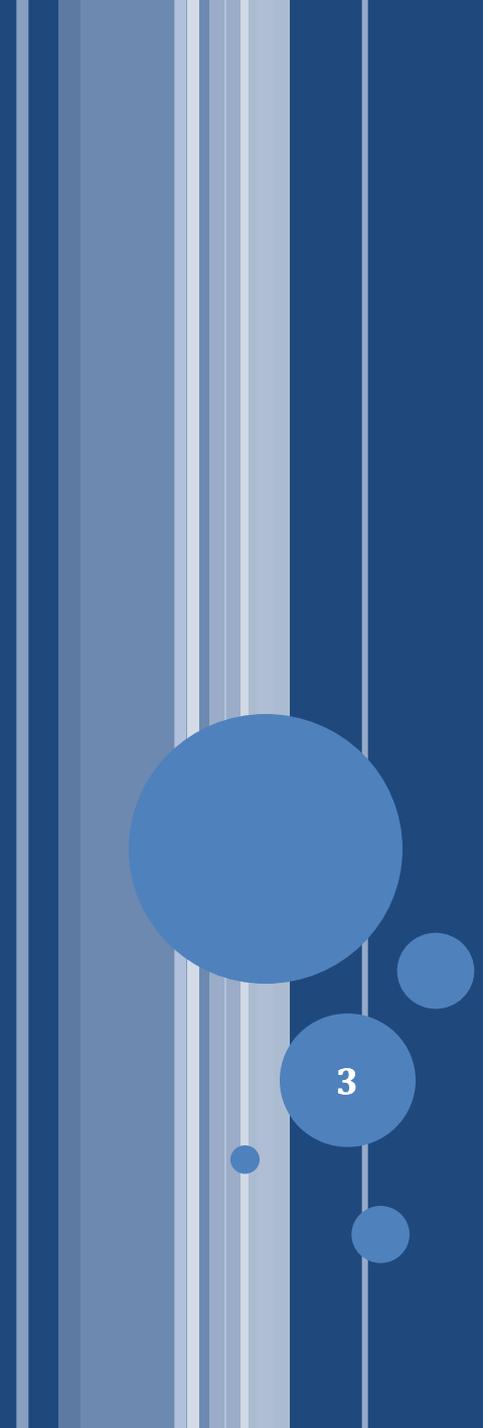
ДИОДЫ СВЧ



1

ДИОДЫ СВЧ

- Варикапы и варакторы
- PIN-диоды
- Диоды с барьером Шоттки
- Лавинно-пролетные диоды
- Диоды Ганна

The left side of the slide features a series of vertical stripes in various shades of blue, ranging from light to dark. Overlaid on these stripes are several circles of different sizes, also in shades of blue. One large circle is positioned near the top left, and several smaller circles are scattered below it, some overlapping the stripes.

ВАРИКАПЫ И ВАРАКТОРЫ

3

ВАРИКАПЫ И ВАРАКТОРЫ

Варикапами и **варакторами** называют полупроводниковые диоды, величина емкости которых зависит от приложенного к диоду напряжения.

Данные диоды относят к управляющим реактивным диодам, так как они изменяют свое реактивное сопротивление при изменении приложенного напряжения

НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

- ▣ **Варикапы** используют в режиме управляемой емкости, когда значение емкости управляется постоянной составляющей напряжения, приложенного к диоду. Поэтому варикапы применяются для создания контуров с переменной резонансной частотой.
- ▣ **Варакторы** используют в режиме нелинейной емкости, при котором используется зависимость емкости от мгновенного значения переменного напряжения, что позволяет применять варакторы для умножения частоты.

Барьерная емкость диода

$$C_{\bar{b}} = \frac{a}{(\varphi_k - U)^n}$$

где:

a - постоянная пропорциональная площади р-п перехода

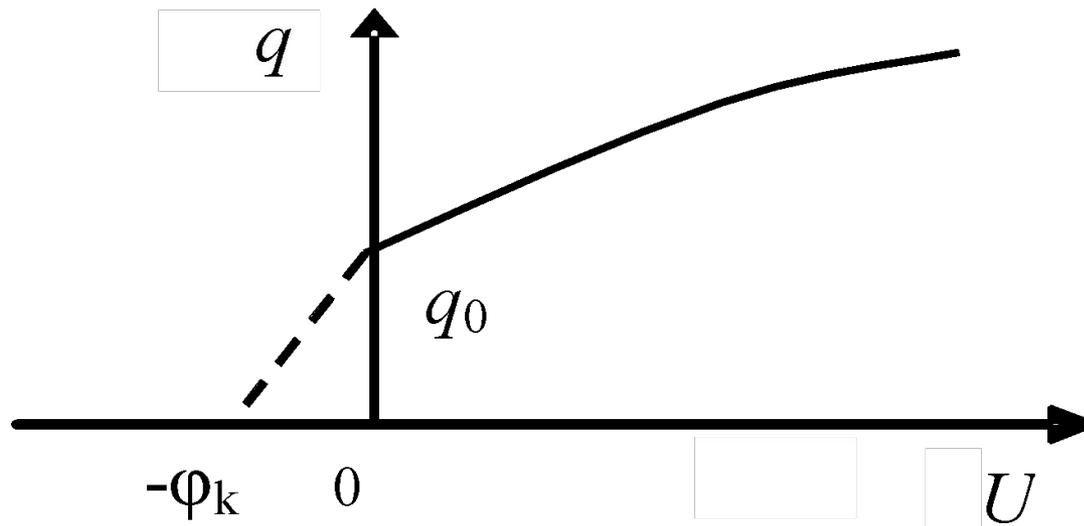
n - показатель, зависящий от вида зависимости распределения примесей вблизи р-п перехода (для резкого р-п перехода $n = 1/2$, для плавного $n = 1/3$)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- ▣ **Вольт-кулоновая характеристика**
- ▣ **Вольт-фарадная характеристика**

ВОЛЬТ-КУЛОНОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАРЬЕРНОЙ ЕМКОСТИ

ВОЛЬТ-КУЛОНОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА - ЗАВИСИМОСТЬ ЗАРЯДА Q ОТ ПРИЛОЖЕННОГО К НЕЛИНЕЙНОЙ ЕМКОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ U .



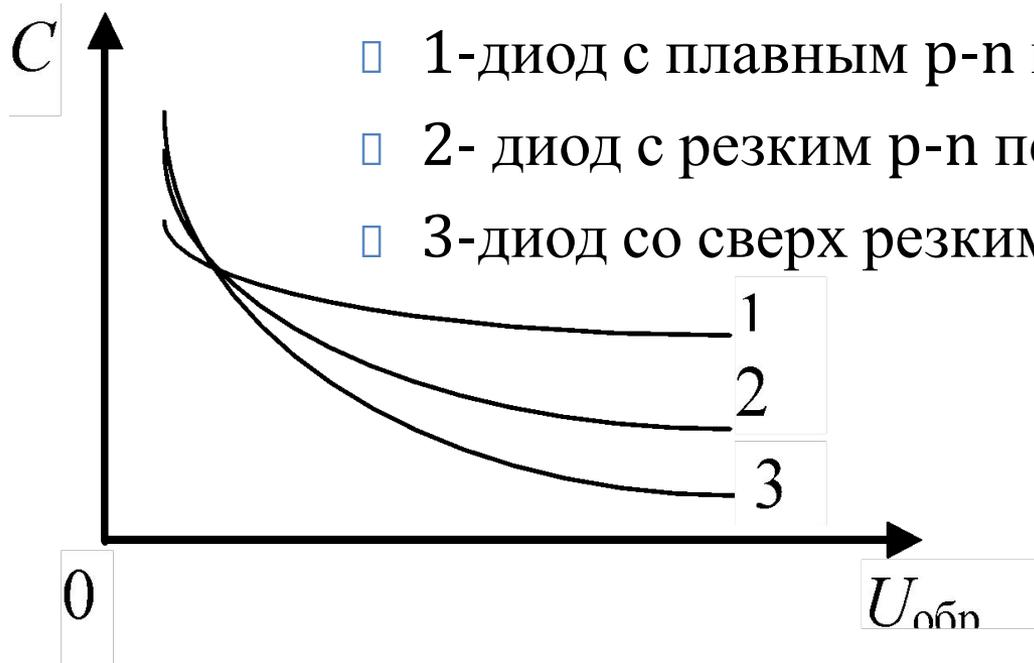
q_0 начальный заряд

Вольт-фарадная характеристика

Вольт-фарадная характеристика – зависимость емкости диода от постоянного (обратного) напряжения, приложенного к диоду .

$$C(U) = \left. \frac{dq}{du} \right| = F(U)$$

ВОЛЬТ-ФАРАДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАРЬЕРНОЙ ЕМКОСТИ

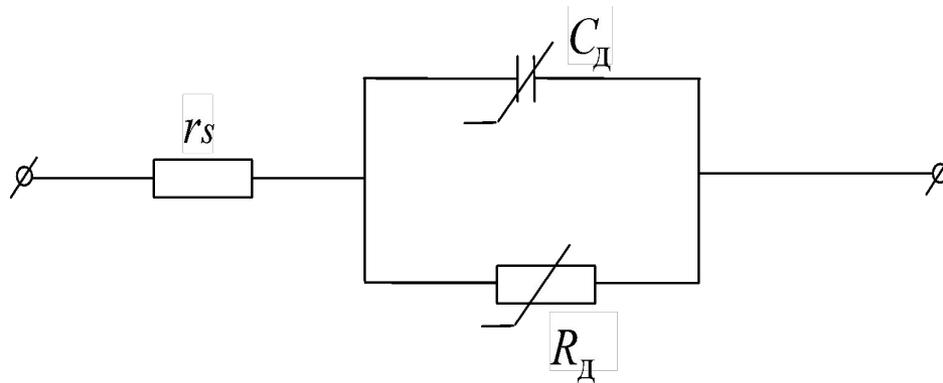


- 1-диод с плавным p-n переходом($n = 1/3$)
- 2- диод с резким p-n переходом($n = 1/2$)
- 3-диод со сверх резким переходом($n=3$)

Если известна величина емкости при нулевом смещении $C(0)$, то зависимость емкости диода от обратного напряжения можно выразить как

$$C_{\bar{b}} = \frac{C(0)}{(1 - U / \varphi_k)^n}$$

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДИОДА



В этой схеме нелинейная емкость и нелинейное сопротивление диода в зависимости от приложенного напряжения соответствуют

$$C_D = C_b, R_D = R \quad U < \varphi_k$$

$$C_D = C_d, R_D = R_\beta \quad U \geq \varphi_k$$

где C_b и C_d - барьерная и диффузионная емкости диода, R - сопротивление утечки, R_β сопротивление рекомбинации, r_s - сопротивление потерь.

Рабочий диапазон частот диода

$$\frac{1}{R_{\text{д}} \text{ д}} \ll \omega \ll \frac{1}{r \text{ с} C_{\text{с}} \text{ д}}$$

$$\omega_{\text{гр}} = \frac{1}{C_{\text{с}} \text{ б}}$$

$$\omega_{\beta} = \frac{1}{R_{\text{д}} \text{ д} R \text{ с} C_{\beta} \text{ д}} = \frac{1}{\tau_{\beta}}$$

СПРАВОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИОДА

- **емкость диода** - емкость C_{δ} при обратном справочном напряжении $U_{СПР}$
 $U_{СПР}$ напряжение, при котором определяется ряд параметров варикапа.
- **Добротность диода** - отношение реактивного сопротивления диода к сопротивлению потерь

$$Q = \frac{1}{2\pi f C_{\delta} (U_{спр}) r_s}$$

- **Граничная частота** - $\omega_{гр} (U_{спр}) = \frac{1}{C_{\delta} (U_{спр})}$.

СПРАВОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИОДА

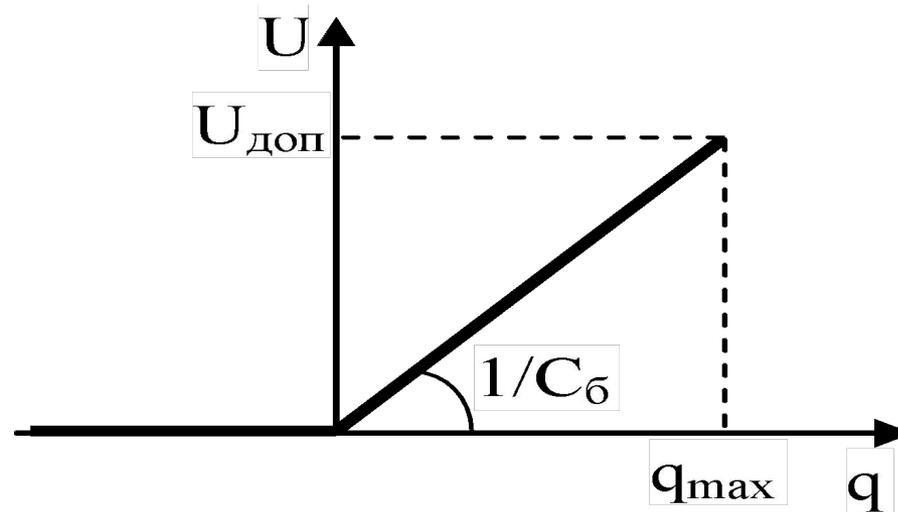
- Сопротивление потерь - r_S .
- Время жизни носителей заряда - τ_β
- Максимально допустимое запирающее напряжения на диоде - $U_{\text{доп}}$.
- Максимально допустимая рассеиваемая мощность на диоде - $P_{\text{рас}}$
- Время восстановления закрытого р-п перехода - t_B .

ПРИМЕР

справочные параметры отечественного диода 2А609А

C_{σ} , пФ при $U = 6 \text{ В}$	$f_{\text{эр}}$, ГГц	$U_{\text{доп}}$, В	$P_{\text{рас}}$, Вт	τ_{β} , нс	$t_{\text{в}}$, нс
1,1 – 1,8	150	40	2	30 - 70	0,1 - 0,25

УПРОЩЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМА РАБОТЫ ВАРАКТОРА



Идеальная вольткулоновая характеристика (ВКХ) является кусочно-линейной аппроксимацией реальной характеристики.

В идеальной характеристике

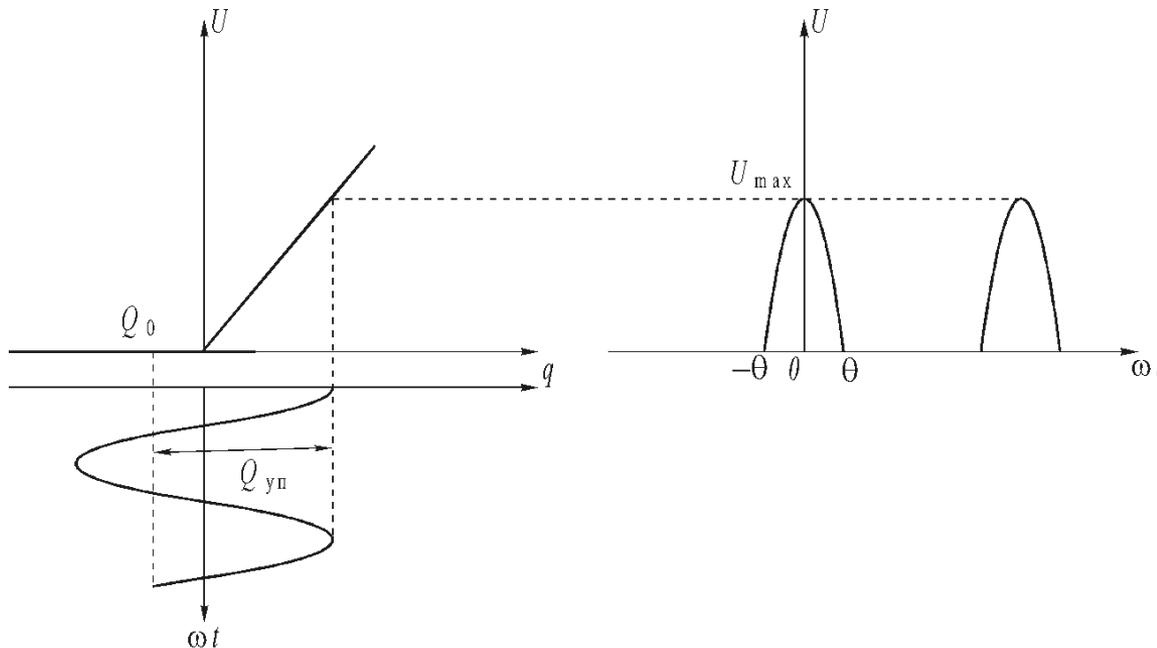
- диффузионная емкость $C_{\text{диф}} \rightarrow \infty$,
- барьерная емкость считается постоянной и не зависит от напряжения.
- не учитывается небольшое напряжение открывания p-n перехода (считается, что p-n переход открывается при $U = 0$).

□ Аналитическая запись аппроксимированной ВКХ

$$U = \begin{cases} q / C_{\delta}, & 0 \leq q \leq q_{\max} \\ 0, & q < 0 \end{cases}$$

Предположим, что заряд на варакторе изменяется по гармоническому закону с частотой ω

$$q(t) = Q_0 + Q_1 \cos \omega t$$



Напряжение на варакторе $u(t)$ при воздействии $q(t)$

$$U(t) = \begin{cases} Q_1 (\cos \omega t - \cos \theta) / C_6, & -\theta \leq \omega t \leq \theta, \\ 0, & \theta \leq \omega t \leq 2\pi - \theta, \end{cases}$$

где θ - угол отсечки напряжения;

Так как зависимость $u(t)$ представляет последовательность косинусоидальных импульсов, можно применить метод угла отсечки и определить амплитуду n -ой гармоники напряжения на варакторе U_n

$$U_n = |\gamma_n(\theta)| \frac{Q_1}{C}, \quad \gamma_n(\theta) \quad - \text{коэффициент Берга}$$

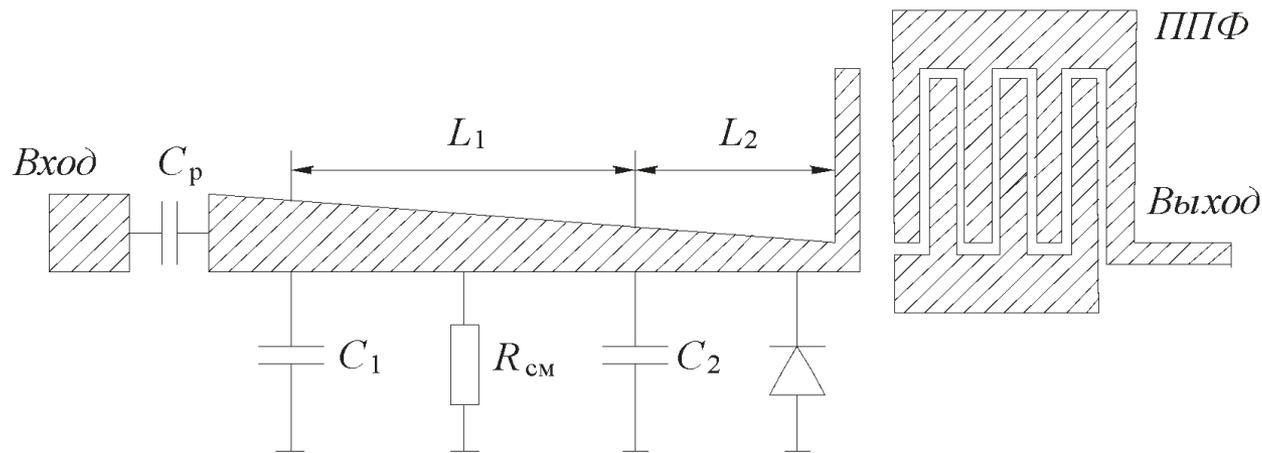
Режим варактора считается **оптимальным**,
если максимален КПД

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_1}$$

Максимальный КПД достигается при **оптимальном**
угле отсечки

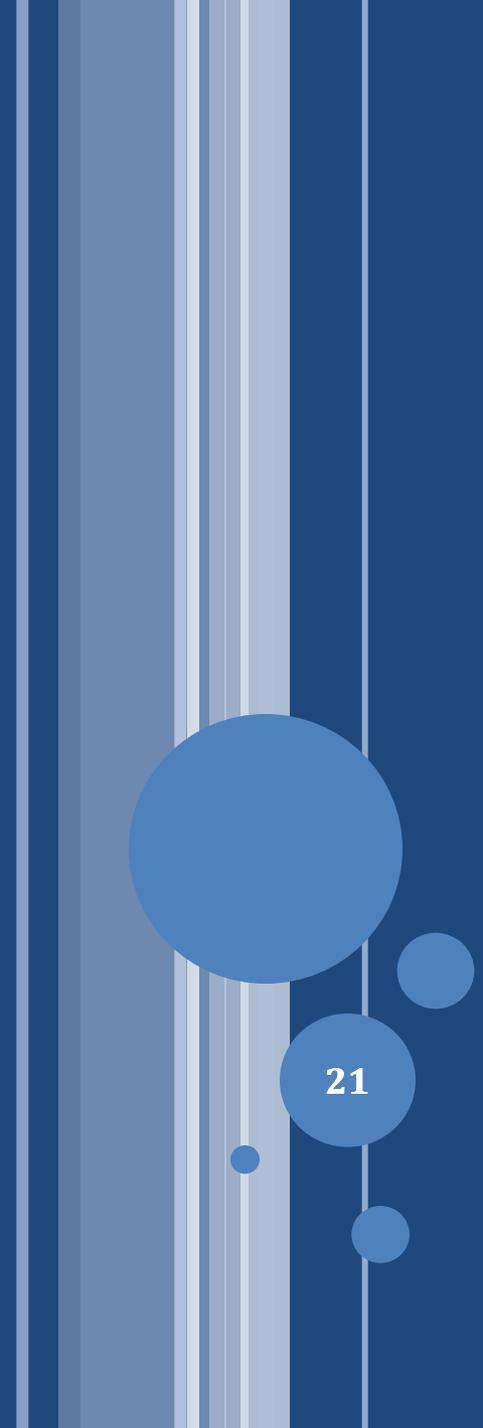
$$\theta_{opt} = \frac{\pi k}{n}$$

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАРАКТОРА В УМНОЖИТЕЛЕ ЧАСТОТЫ



- В схеме умножителя входная цепь выполнена в виде ФНЧ, образованного сосредоточенными емкостями C_1 , C_2 и индуктивностями L_1 , L_2 , выполненными на отрезках МПЛ.

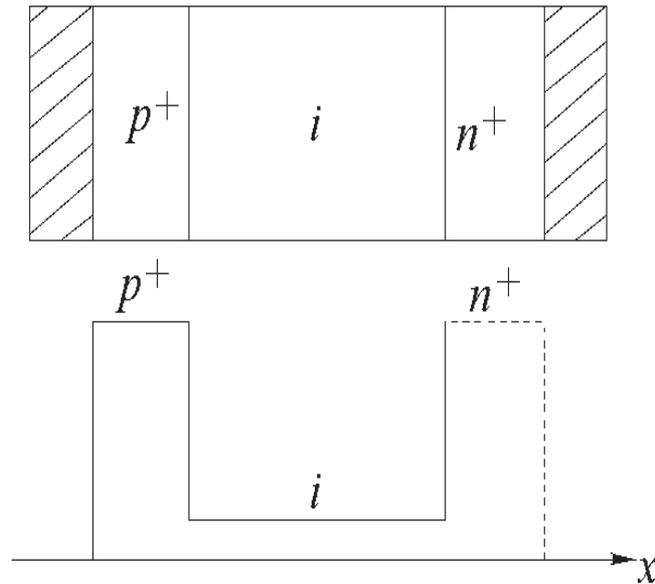
Выходная цепь выполнена в виде полосно-пропускающего фильтра (ППФ), настроенного на выходную частоту n -й гармоники. ППФ и индуктивность L_2 обеспечивают развязку входной и выходной цепей. Постоянное напряжение на варакторе задается сопротивлением $R_{см}$, емкость C_p является разделительной емкостью.

A decorative vertical bar on the left side of the slide, consisting of several thin, parallel lines in various shades of blue. To the right of these lines are several overlapping circles of different sizes, also in shades of blue, arranged in a vertical sequence.

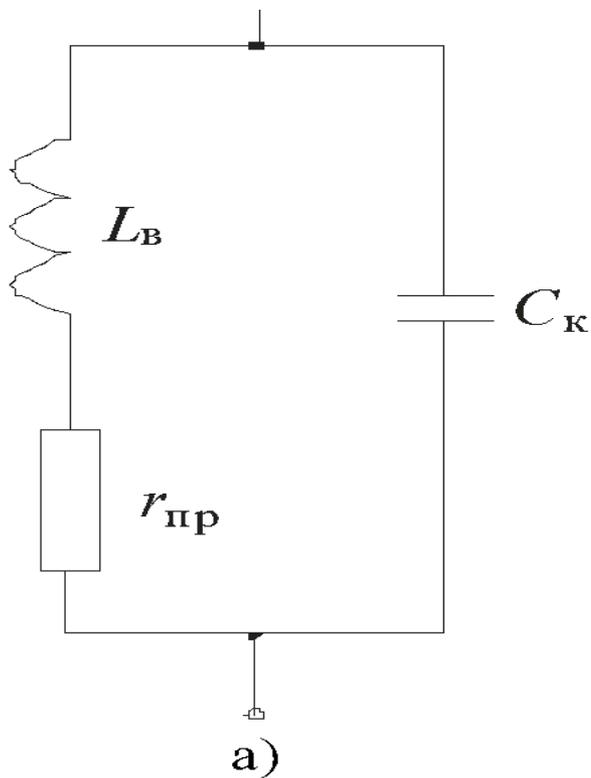
УПРАВЛЯЮЩИЕ PIN-ДИОДЫ

21

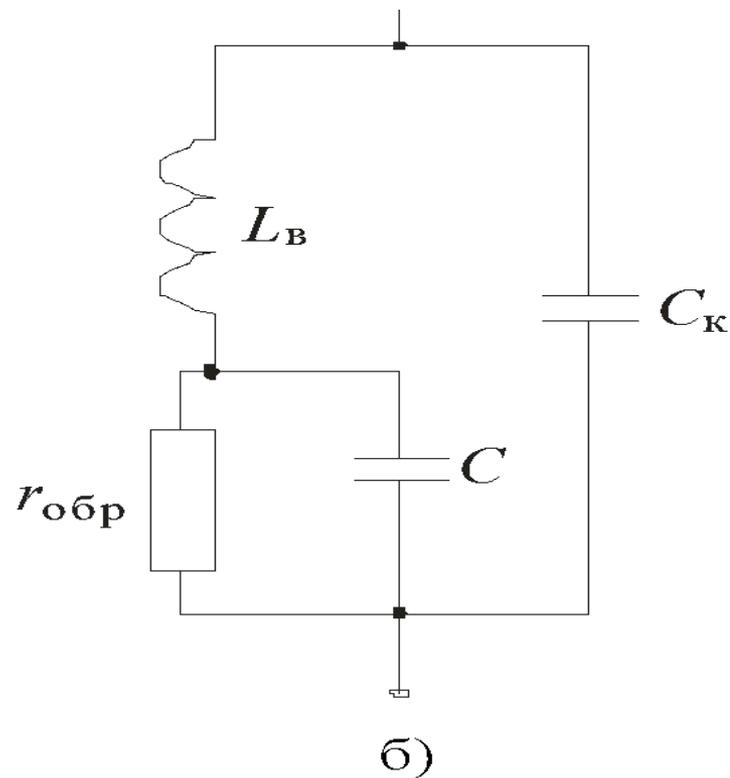
СТРУКТУРА PIN-ДИОДА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ДИОДЕ



ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДИОДА



В открытом состоянии



В закрытом состоянии

ПРИНЦИП РАБОТЫ

- При работе в прямом направлении на достаточно высоких частотах f , определяемых соотношением

$$2\pi f\tau_{\beta} \gg 1$$

диффузионная емкость p^+i и n^+i переходов диода полностью их шунтирует. В схеме $r_{\text{пр}}$ -сопротивление базы, определяемое прямым током, $r_{\text{пр}} \sim K/I_{\text{пр}} \sim 1 \text{ Ом}$

- При обратном смещении

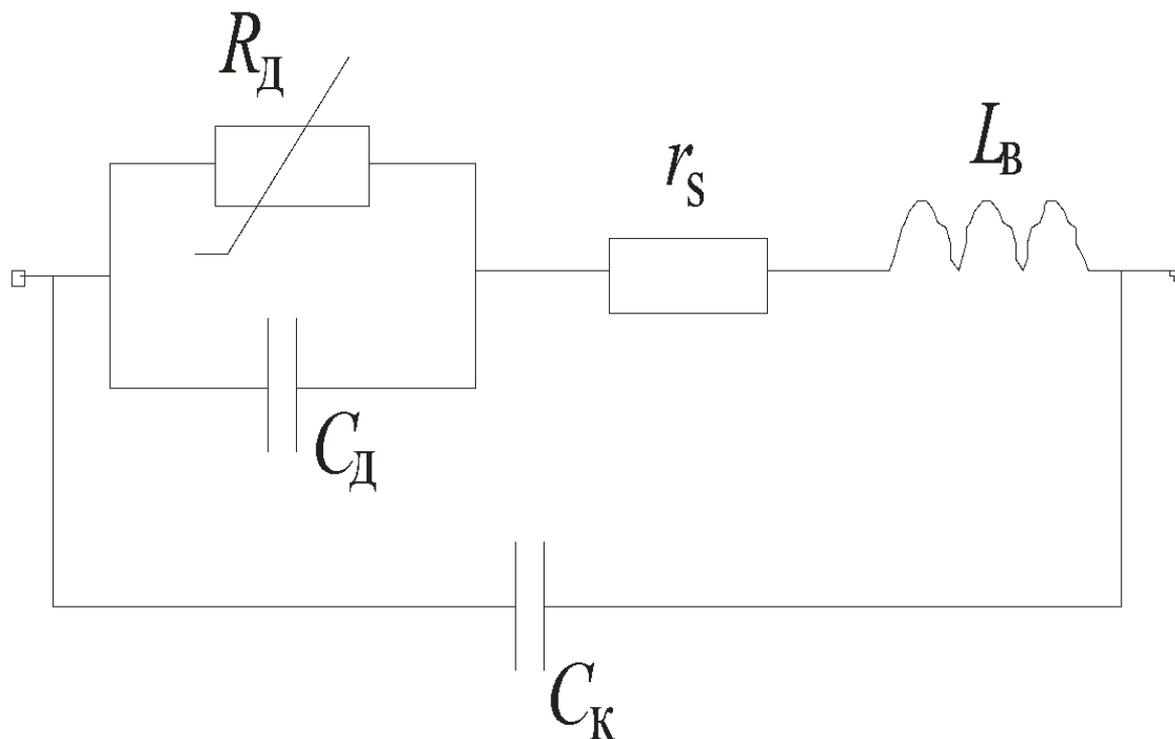
$$r_{\text{обр}} = r_i W_i / S_i, \sim 1-10 \text{ кОм}$$

где r_i - удельное сопротивление i -области;

W_i - толщина i -области;

S_i - площадь диода.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДИОДА С УЧЕТОМ КОРПУСА



СПРАВОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ PIN-ДИОДА

- **Полная емкость диода.** Суммарная емкость

$$C_T = C_K = C_B$$

- **Полное сопротивление диода.** Суммарное сопротивление

$$r_T = r_{пр} + r_s$$

- **Напряжение пробоя.** Напряжение пробоя pin-структуры определяется соотношением

$$U_{проб} = E_{кр} W_i$$

где $E_{кр}$ – критическая величина напряженности электрического поля, которая обычно принимается равной $E_{кр} = 2 \cdot 10^5$ В/см.

- **Время переключения диода с прямого направления на обратное.** Это время состоит из двух времен.

$$t = t_p + t_v$$

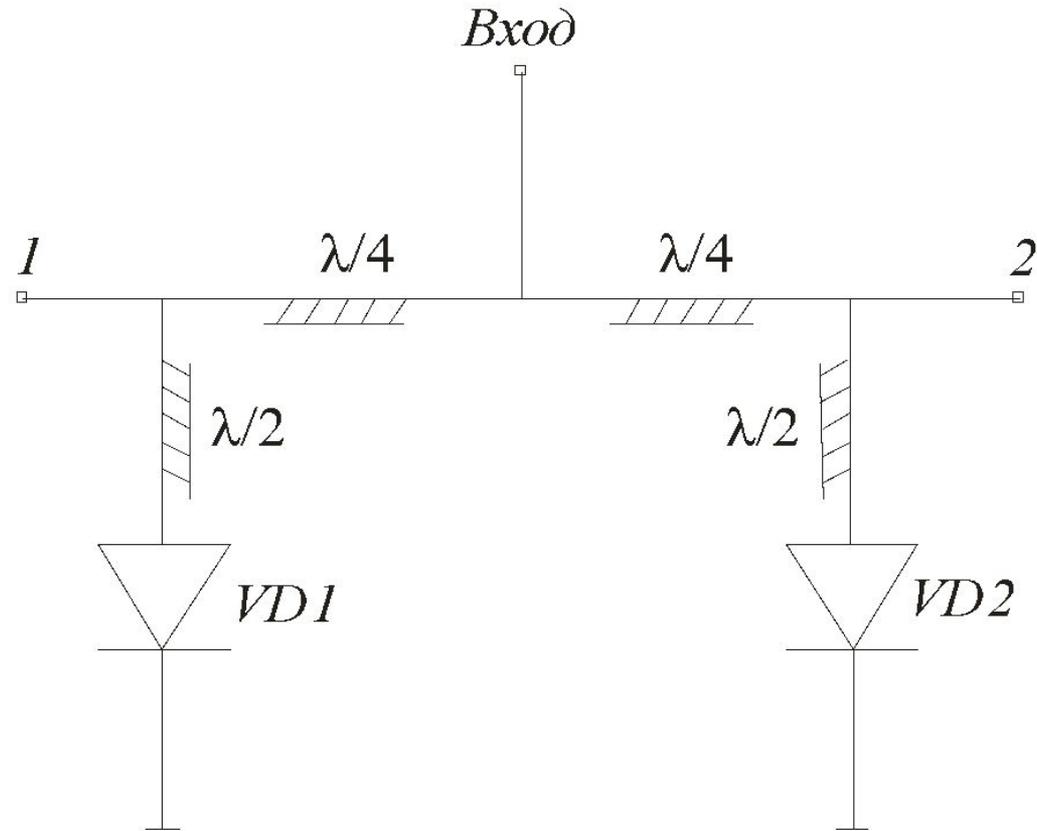
$$t_p = Q_{нк} / I_p = I_{пр} \tau_\beta / I_p \quad \text{И} \quad t_v = W_i^2 / (\mu_{p,n} U_{обр})$$

ПРИМЕР

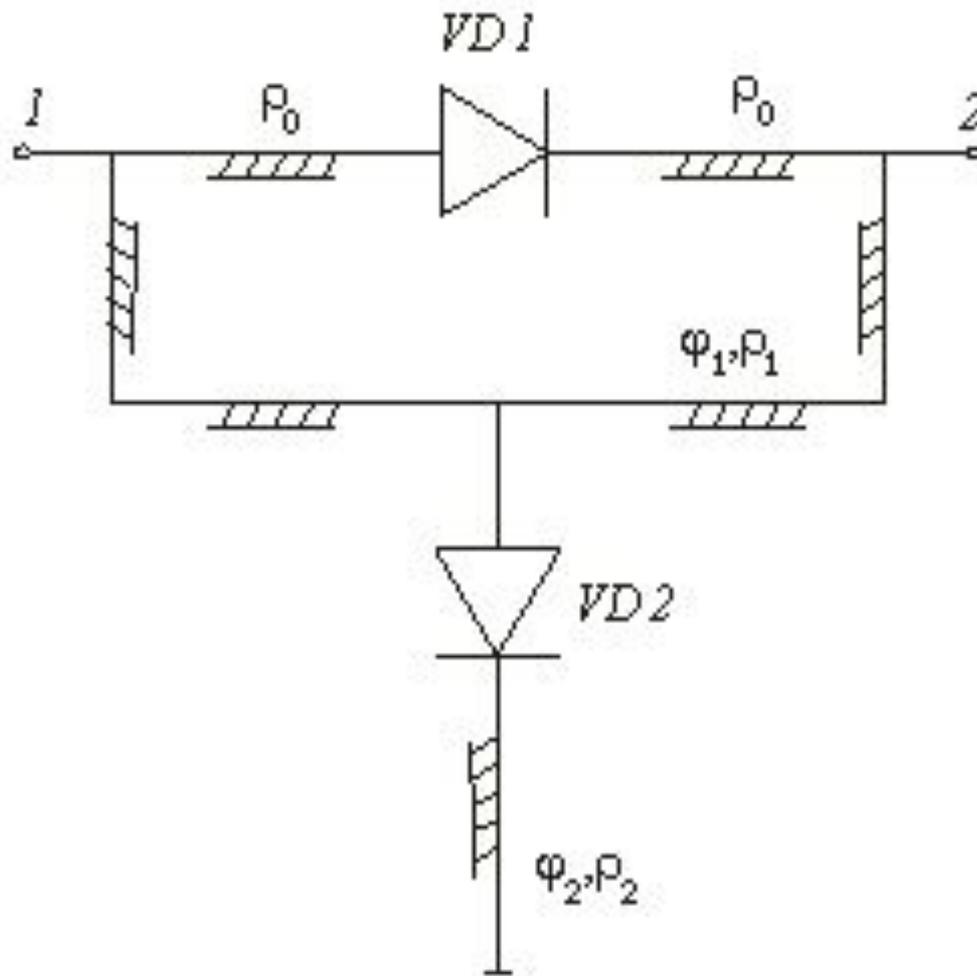
- справочные параметры *pin* - диода HSMP-3890

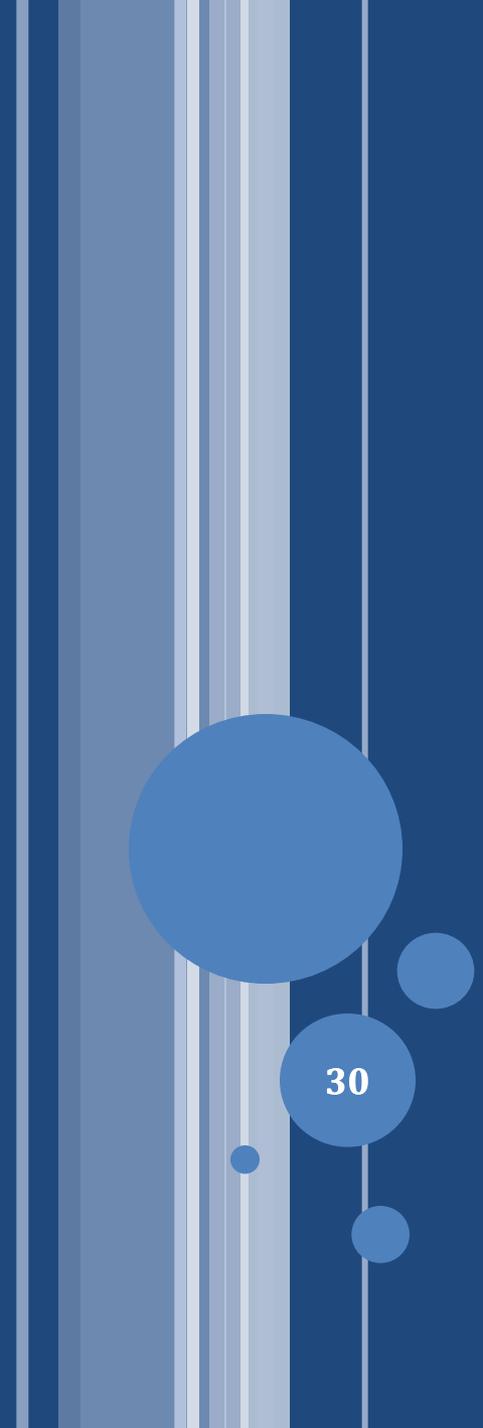
C_T , pF	r_T , Ohm at $I_F = 1\text{mA}$	V_{bR} , V	P_{pac} , mW	τ_β , нс at $I_F = 10\text{mA}$	tB, нс
0.3	3.8	100	250	200	550

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ НА PIN-ДИОДАХ



ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ НА PIN-ДИОДАХ



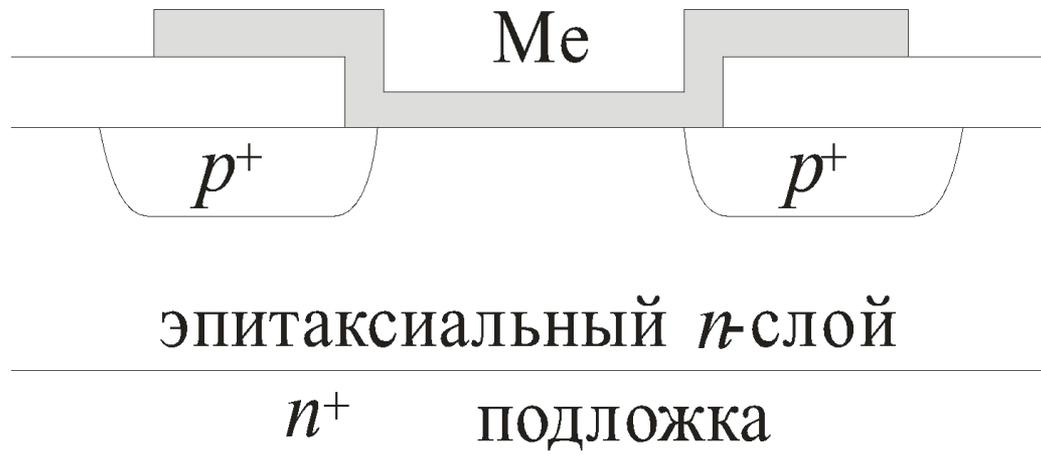


ДИОДЫ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

30

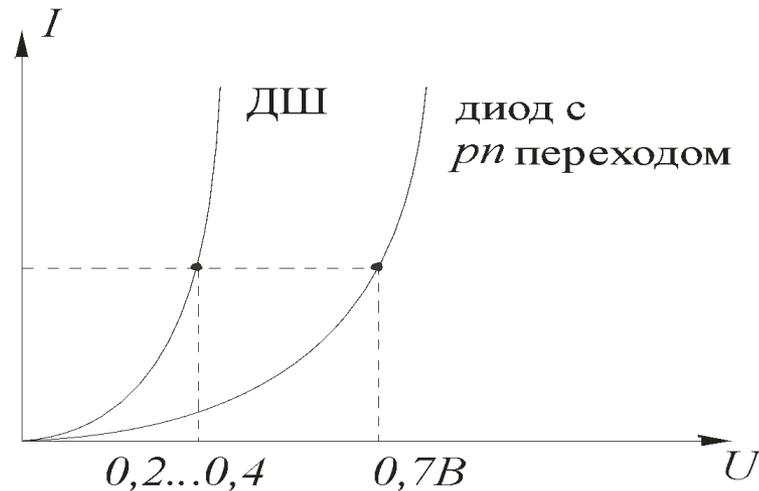
СТРУКТУРА ДИОДА ШОТТКИ

- Структура диода Шоттки представляет собой низкоомную полупроводниковую подложку с высоким содержанием донорной примеси, покрытой сверху тонкой пленкой того же, но более высокоомного полупроводника, на которую нанесен металлический слой.



ОСОБЕННОСТИ ДИОДА ШОТТКИ

- На переходе диода создается значительно меньшее падение напряжения (0,2-0,4 В), чем на электронно-дырочном переходе



Прямая ВАХ строго подчиняется экспоненциальному закону

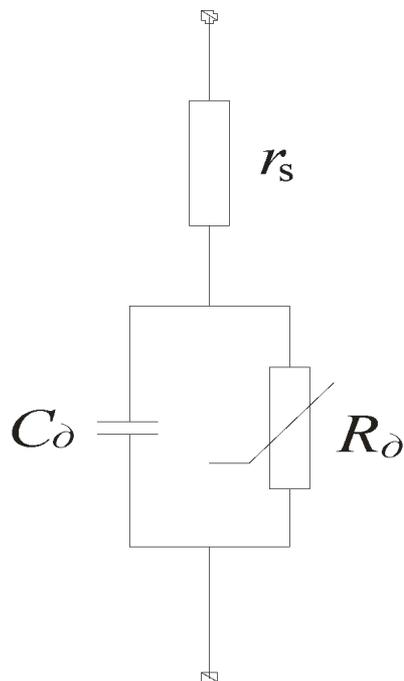
$$I = I_s \left(e^{U/\varphi_T} - 1 \right)$$

Где φ_T – температурный потенциал I_s -ток насыщения

ОСОБЕННОСТИ ДИОДА ШОТТКИ

- Так как переходы работают только на основных носителях то, следовательно, в диодах, изготовленных на **основе эффекта Шоттки**, отсутствует диффузионная емкость, связанная с накоплением и рассасыванием неосновных носителей.
- Отсутствие диффузионной емкости существенно повышает быстродействие диодов, поэтому диоды, выполненные на основе такого контакта, являются более высокочастотными и обладают существенно лучшими переключающими свойствами, чем диоды на основе контакта полупроводник-полупроводник.

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ДИОДА ШОТТКИ



$$R_d = \frac{8,33 \cdot 10^{-5} nT}{I + I_s}$$

В данной схеме r_s - сопротивление потерь в металле и в приконтактной области полупроводника;

C_d - паразитная емкость эпитаксиального слоя под металлическим контактом;

R_d - сопротивление перехода диода

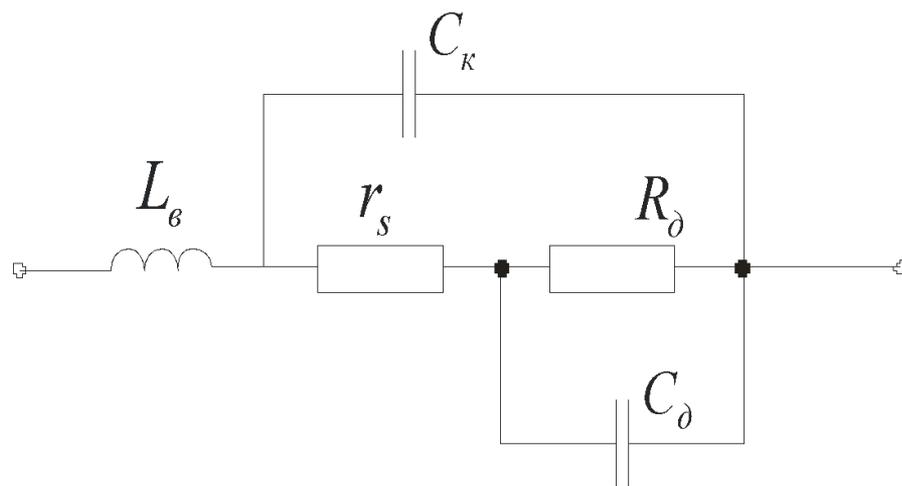
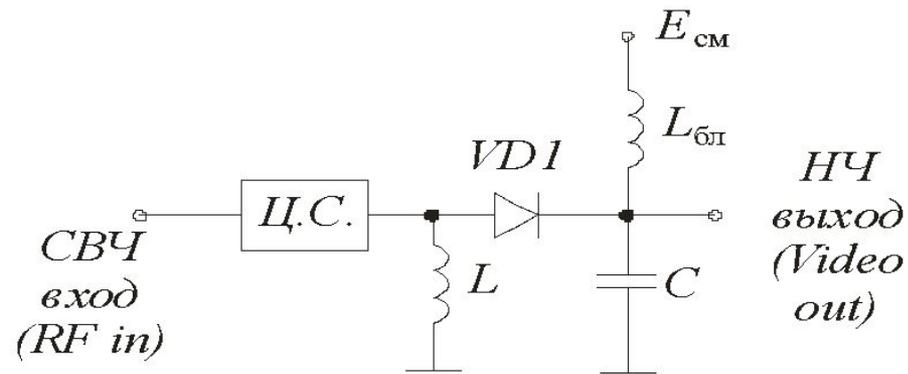


Схема диода в корпусе

$$C_{\text{Э}} = C_d + C$$

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРИБОРАХ СВЧ



последовательная схема детектора

ПРИМЕНЕНИЕ В ПРИБОРАХ СВЧ

Параметры детектора

- чувствительность детектора, которая определяется величиной минимальной входной мощности, при которой на выходе детектора НЧ сигнал превышает сигнал шума;
- чувствительность детектирования γ - отношение напряжения на выходе детектора к мощности СВЧ сигнала;
- входной СВЧ импеданс диода;
- выходной НЧ импеданс диода.

Некоторые параметры детекторного диода HSMS-286B

C_T , pF	V_F , mV $I_F = 1\text{mA}$	Чувствительность по мощности dBm при $f=915\text{ MHz}$	Чувствительность по напряжению γ , mV/ μW на частоте $f=915\text{ MHz}$ при $P_{in} = -40\text{ dBm}$, $I_b = 5\mu\text{A}$	Видео сопроти вление R_v , K Ω
0.25	250	-57	50	5.0

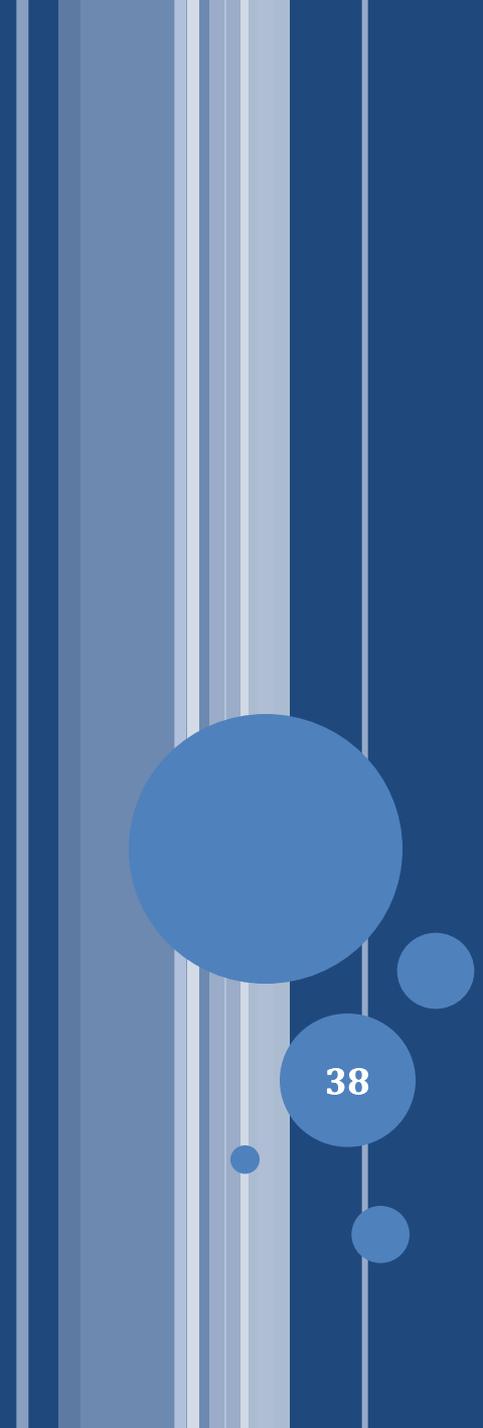
ПРИМЕНЕНИЕ В ПРИБОРАХ СВЧ

Смеситель

- Потери преобразователя-отношение мощности СВЧ сигнала, поступающего на вход смесительного диода, к мощности сигнала ПЧ на выходе ;
- Импеданс на промежуточной частоте - Z_{IF} .

Некоторые параметры смесительного диода HSMS-82

Полная емкость C_T , pF	Максимальное Прямое напряжение V_F , mV при токе $I_F=1\text{mA}$	Максимальное обратное напряжение V_{BR} , V при токе $I_R=10\mu\text{A}$	Потери преобразования L, dB на частоте $f=12\text{ GHz}$	Динамическое сопротивление R_D , Ω при токе $I_F=5\text{mA}$
0,26	350	4	6,3	14



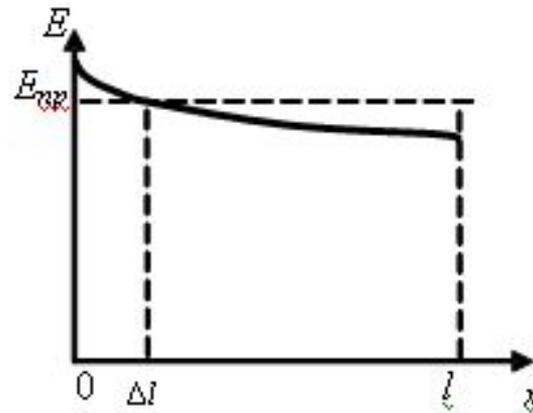
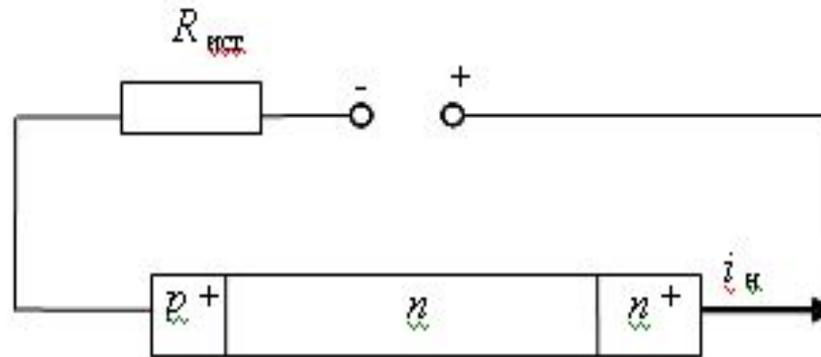
ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫЕ ДИОДЫ

38

СТРУКТУРА ЛПД

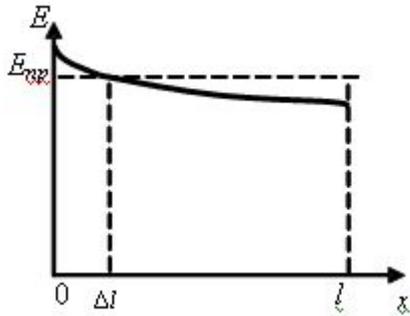
- **Лавинно-пролетный диод (ЛПД)** - полупроводниковый диод с р-п переходом, принцип работы которого основан на 2-х процессах: лавинном пробое и пролете носителей через обедненную область.

Структура диода



Распределение поля в структуре

ПРИНЦИП РАБОТЫ

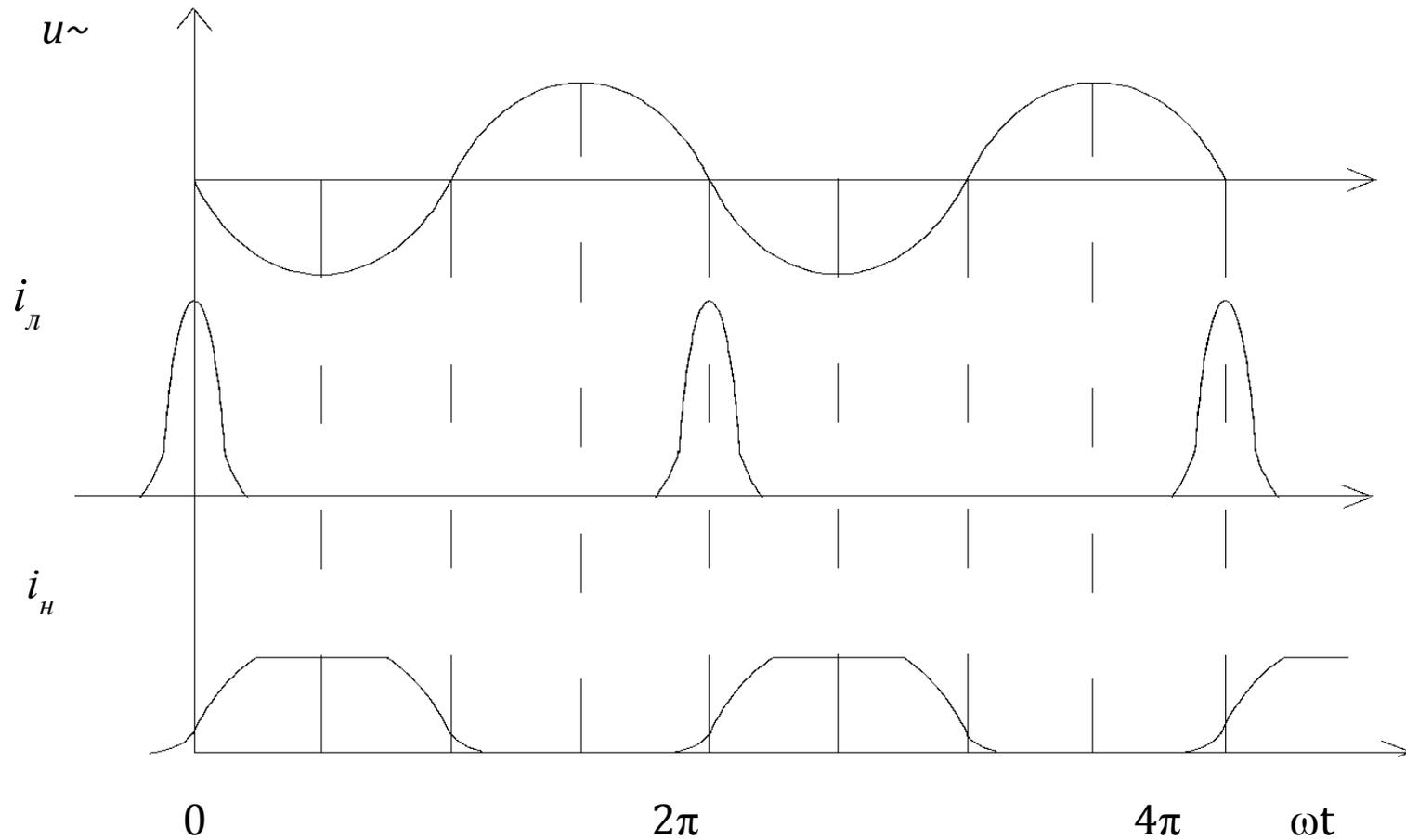


Если приложить к диоду обратное напряжение и увеличивать его, то наступит электрический пробой.

Пробой наступает при напряжении $U_{пр}$, что соответствует напряженности $E_{пр}$. При $E > E_{пр}$ в узкой области, прилегающей к p^+n переходу, начинается процесс ударной ионизации и лавинообразно образуются электроны и дырки. Область, в которой локализован лавинообразный процесс, называют **областью умножения** (на рисунке соответствует участку Δl).

С течением времени под действием поля дырки уходят в p^+ контакт, а электроны - в n^+ контакт. Электроны двигаются со скоростью насыщения к n^+ контакту через **пролетную область** ($l - \Delta l$).

ВРЕМЕННЫЕ ДИАГРАММЫ, ПОЯСНЯЮЩИЕ РАБОТУ ЛПД ПРИ УСТАНОВКЕ В РЕЗОНАТОРЕ

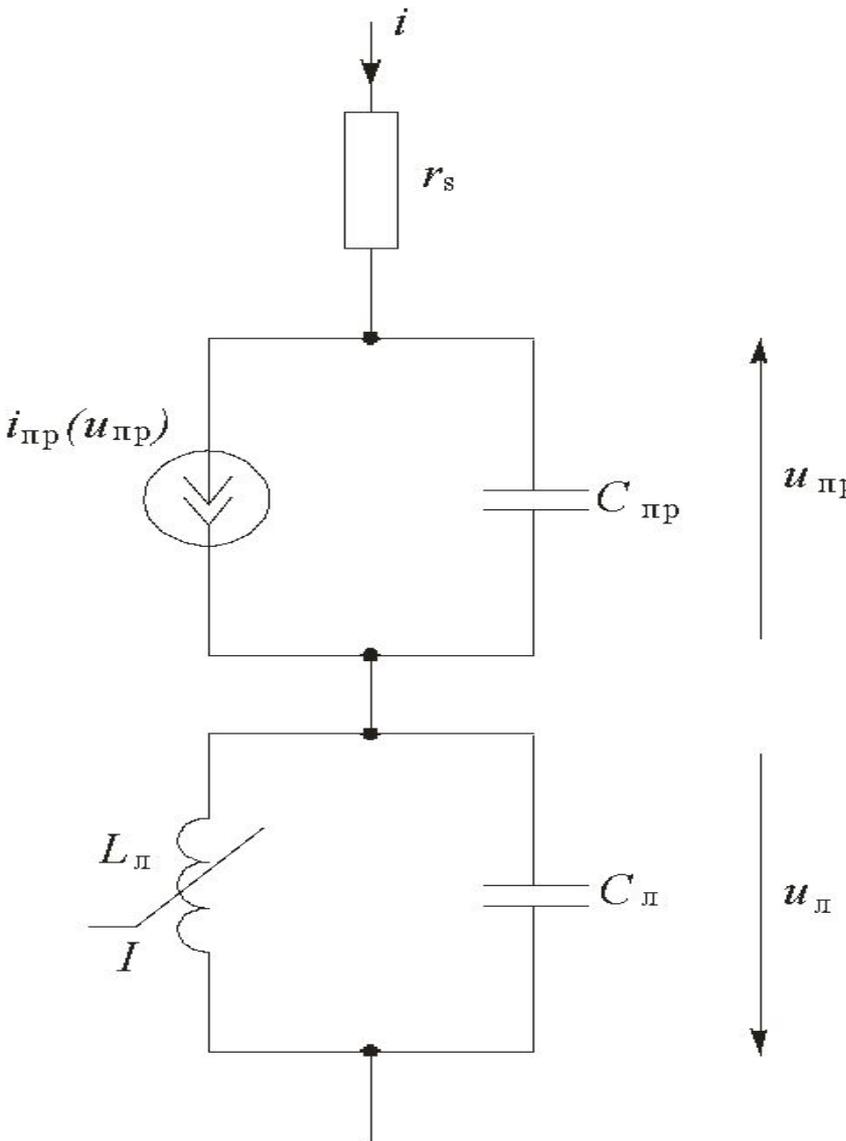


$\tau_{\text{пр}} = (l - \Delta l)/v$ - время пролета электронов через пролетную область ; v - средняя дрейфовая скорость электронов

$T = 2\tau_{\text{пр}}$ - период колебаний, соответствующий частоте настройки колебательной системы

$f_{\text{opt}} = 1/T = 1/2\tau_{\text{пр}}$ - оптимальная частота настройки колебательной системы

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ЛПД



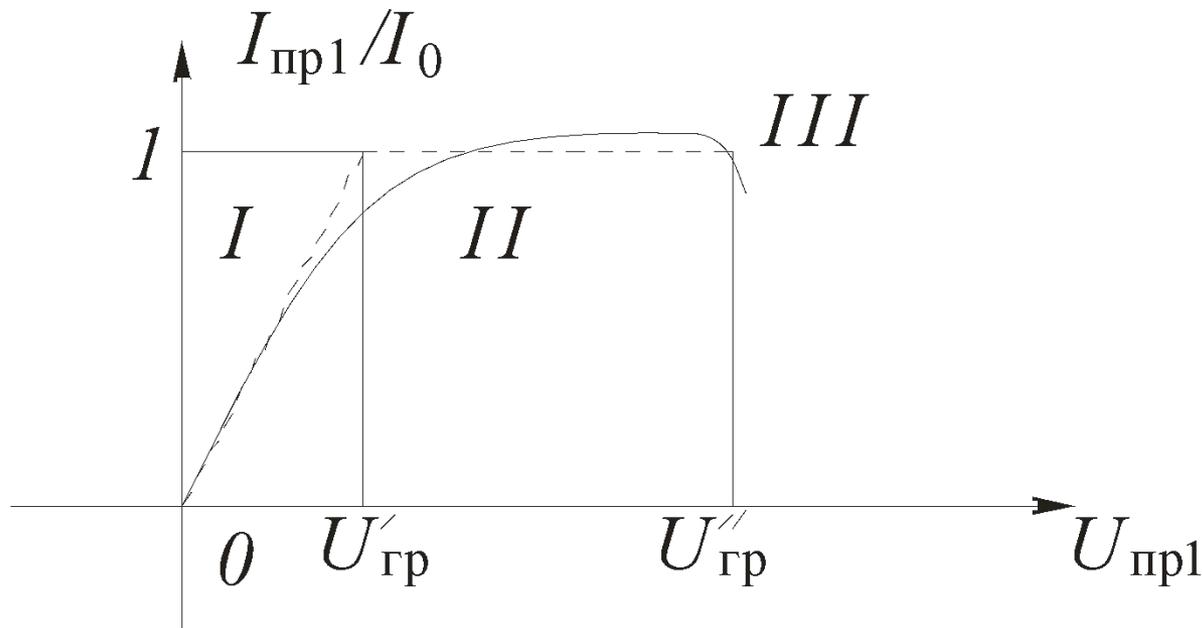
r_s - сопротивление потерь на частоте генерации;

$L_{л}$ - нелинейная индуктивность лавины

$$L_{л} = \frac{\tau_{л} \cdot U_{пр}}{m \cdot I_o}$$

где $\tau_{л} \cong \tau_{пр}/9$ - время процесса лавинообразования; m - коэффициент, зависящий от материала из которого изготовлен диод ($m = 7$ для SiO_2 и $m = 5$ для GaAs);

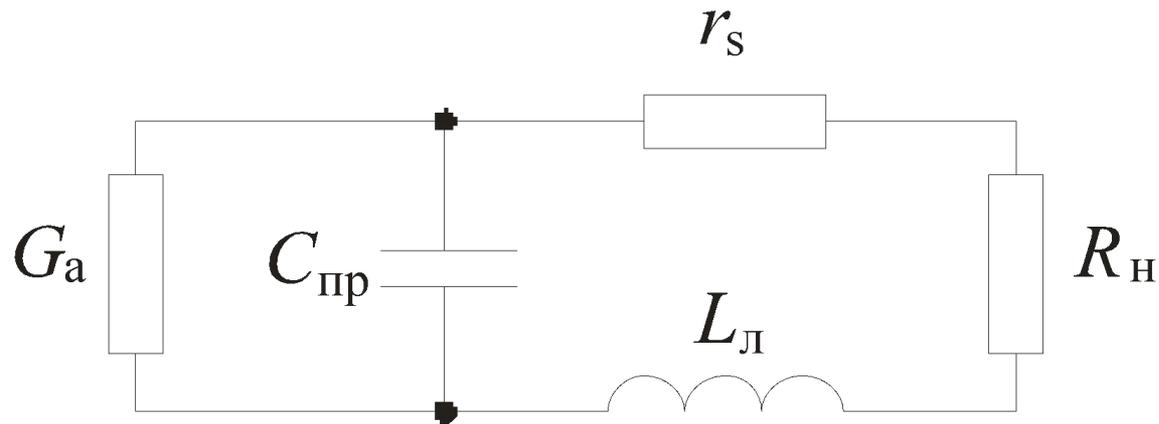
КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛПД



- На характеристике можно выделить три участка : I - почти линейной зависимости $I_{\text{пр1}}$ от $U_{\text{пр1}}$; II - приблизительно постоянной амплитуды тока $I_{\text{пр}}$; III - почти постоянной амплитуды напряжения $U_{\text{пр1}}$.
- Зависимость $I_{\text{пр1}}(U_{\text{пр1}})$ на участке I назовем **режимом малых амплитуд**, на участке II - **режимом больших амплитуд**, а на участке III - **перенапряженным режимом**

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ГЛПД ОШИБКА В

РИС.



- Здесь пролетная область представлена усредненной по первой гармонике отрицательной проводимостью

$$G_a = I_{пр1} / U_{пр1}$$

включенной параллельно емкости $C_{пр}$. В схеме

$R_{н}$ - эквивалентное сопротивление нагрузки диода,

$L_{н}$ - эквивалентная индуктивность полной колебательной системы

r_s - сопротивление потерь.

УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛПД

- Амплитуду I_H можно найти, зная колебательную мощность первой гармоники, отдаваемую пролетной областью диода во внешнюю цепь,

$$P_1 = 0,5I_H^2 (R_H + r_s)$$

Отсюда

$$P_H = P_1 R_H / (R_H + r_s)$$

- Колебательная мощность P_1 может быть рассчитана по формуле

$$P_1 = 0.5I_{\text{пр1}}^2 / |G_a| = 0.5U_{\text{пр1}}^2 |G_a|$$

- В стационарном режиме проводимость колебательной системы

$$G_k = -G_a$$

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛПД

В режиме малых амплитуд максимальная мощность в нагрузке соответствует

$$P_n^I = \frac{1}{2} \frac{I_{0\min} (I_0 - I_{0\min})}{G_{\kappa\min}}$$

при оптимальном сопротивлении нагрузки

$$R_n = r_s \left(\frac{I_0}{I_{0\min}} - 1 \right)$$

где $I_{0\min}$ минимальный постоянный ток диода при возбуждении колебаний в автогенераторе, работающем на пролетной частоте при известном сопротивлении R_n

В режиме больших амплитуд !

$$P_n^{II} = \frac{1}{8} \frac{I_0}{G_{\kappa\min}} \quad R_n = r_s$$

В перенапряженном режиме

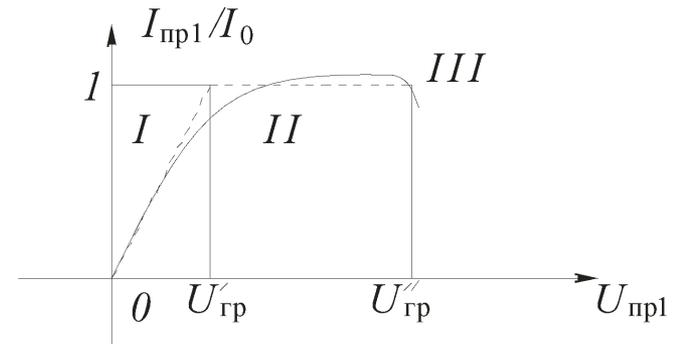
$$P_n^{III} = \frac{I_{0\min} (I_0 - 2I_{0\min})}{G_{\kappa\min}}$$

при оптимальном сопротивлении нагрузки

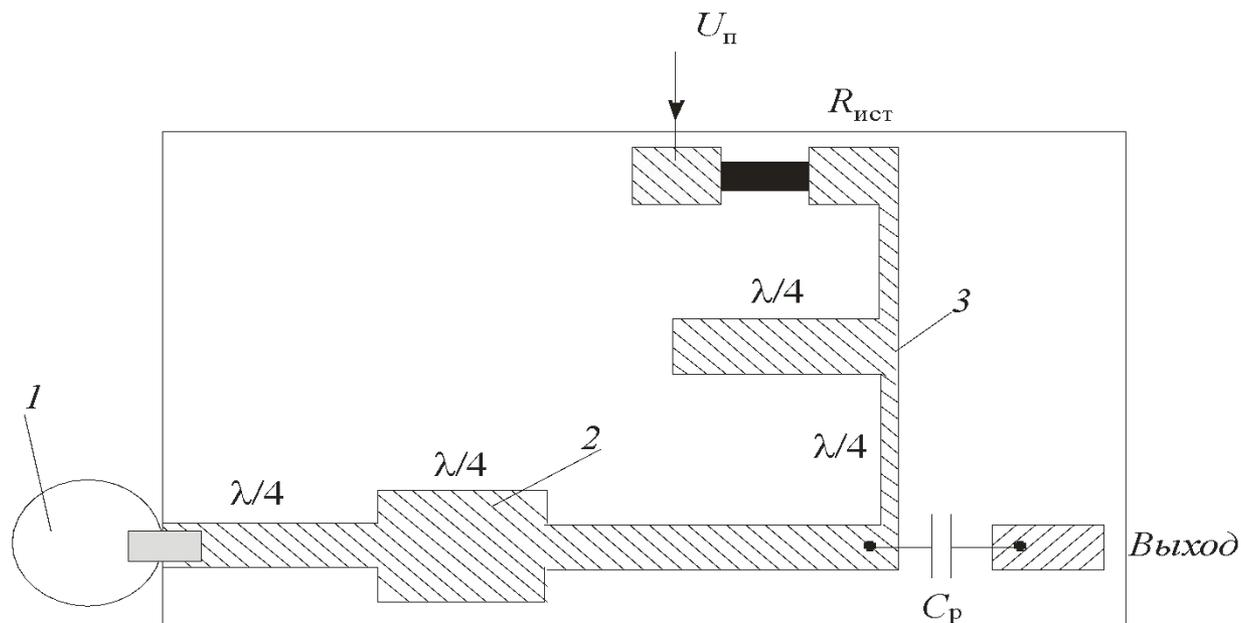
$$R_n = \frac{I_0 G_{\kappa\min}}{2\omega_{np}^2 C_{np}^2 I_{0\min}} - r_s$$

Коэффициент полезного действия генератора или КПД

$$\eta = P_n / P_0 = P_n / I_0 U_0$$



РЕАЛИЗАЦИЯ ГЛПД В МИКРОПОЛОСКОВОМ ИСПОЛНЕНИИ

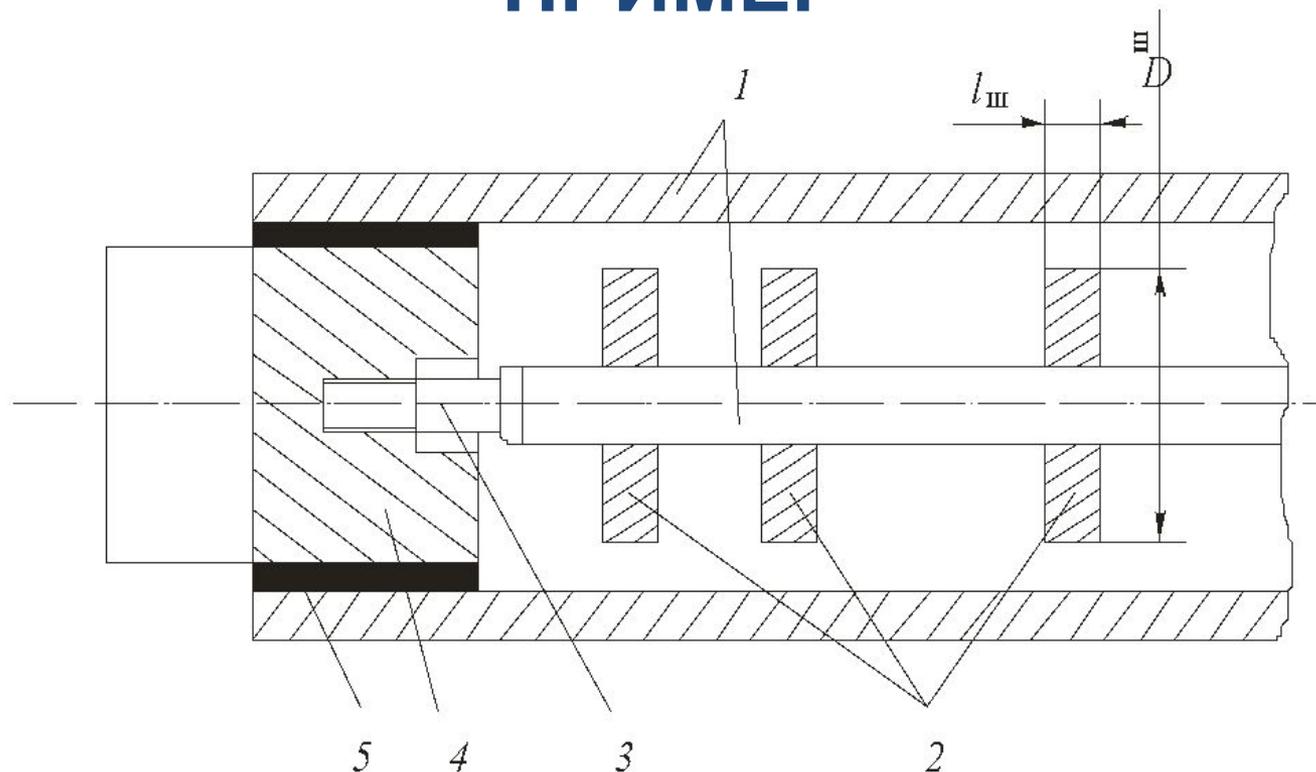


- Питание к диоду 1 подводится через фильтр 3, настройка на нужную частоту осуществляется изменением расстояния от диода 1 до неоднородности 2. Максимальная генерируемая мощность обеспечивается выбором площади неоднородности 2.
- **Параметры ЛПД.** Диапазон рабочих частот от 1 до 150 ГГц. В миллиметровом диапазоне выходная мощность составляет сотни мВт, а в сантиметровом диапазон - единицы Вт.

РАБОТА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНОГО ДИОДА В РЕЖИМЕ С ЗАХВАТОМ ПЛАЗМЫ

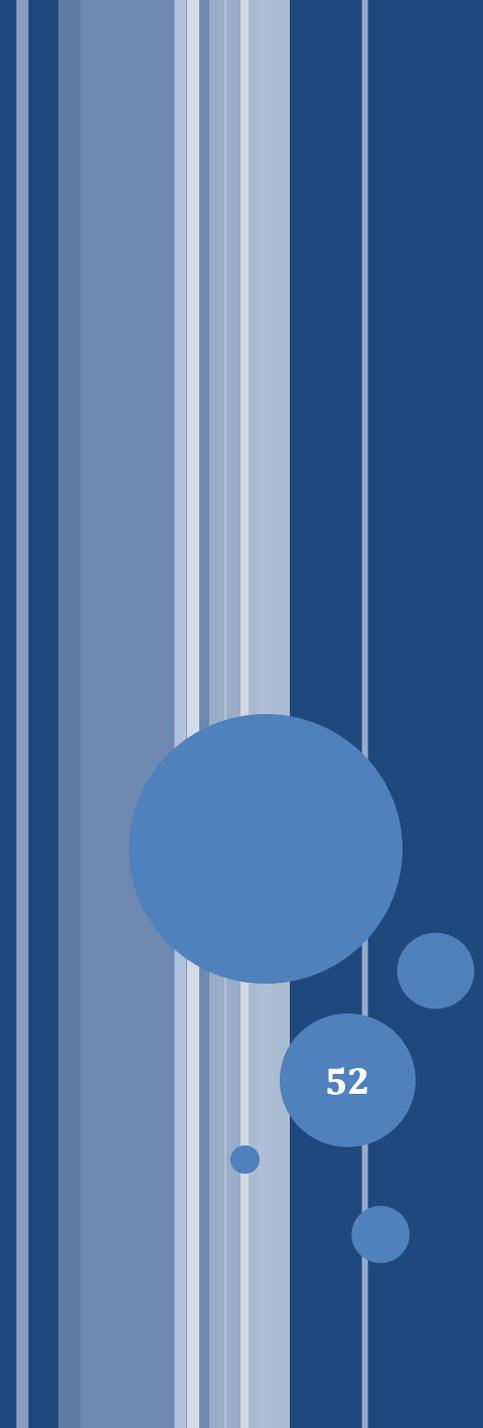
- Помимо пролетного режима ЛПД может работать в так называемом **режиме с «захватом плазмы»**, в зарубежной литературе называемом TRAPATT (Traped Plasma Avalanche Triggered Transit). Диоды, работающие в этом режиме, получили название - лавинно-ключевые диоды.
- **Особенности такого режима:** высокий КПД (до 60 %) более низкая частота, существенно негармонические формы токов и напряжений $i(t)$, $u(t)$. Для работы в режиме с захватом плазмы диод помещают в резонатор, позволяющий обеспечить негармонические формы $u(t)$ и $i(t)$ релаксационного типа. ЛПД, работающие в режиме с захватом плазмы, позволяют получить импульсные мощности порядка сотен ватт на частотах 1...3 ГГц.
- Недостатком режима с захватом плазмы является более высокий уровень шумов генератора.

ПРИМЕР



Коаксиальный генератор на ЛКД.

- 1 – коаксиальная линия;
- 2 – шайба; 3 – ЛКД; 4 – втулка;
- 5 – фторопластовая прокладка

The slide features a dark blue background with a vertical decorative element on the left consisting of several thin, light blue stripes of varying widths. To the right of these stripes are several blue circles of different sizes, arranged in a vertical line. The largest circle is at the top, followed by a smaller one, then a medium-sized one containing the number 52, and finally two more smaller circles at the bottom.

ДИОДЫ ГАННА

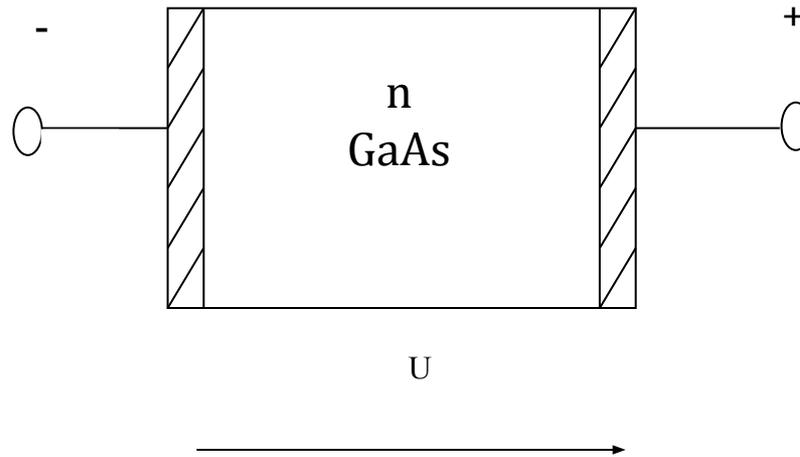
52

ДИОДЫ ГАННА

- ▣ **Диод Ганна** - это генераторный диод СВЧ, работающий в диапазоне частот от единиц до сотен гигагерц, изготовленный, как правило, из арсенида галлия.
- ▣ **Эксплуатационные характеристики диода**
Выходная мощность диода Ганна - от десятков милливатт до долей ватта в непрерывном режиме колебаний, КПД весьма мал - 1 ...5 %. Большой КПД можно получить на диодах из фосфида индия. В импульсном режиме при длительности импульсов не более 1 мкс и скважности, равной нескольким сотням, выходная мощность увеличивается приблизительно на порядок

СТРУКТУРА ДИОДА

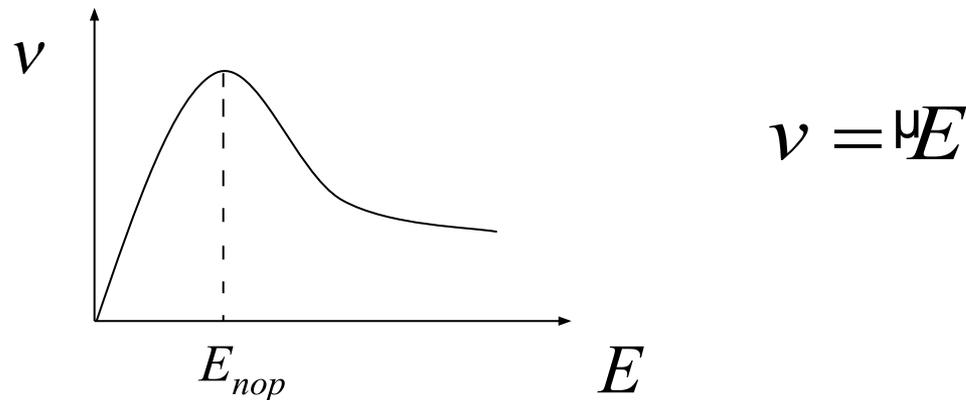
- Диод Ганна представляет собой кристалл однородно легированного арсенида галлия n -типа, выращенного на низкоомной подложке из арсенида галлия p -типа. На противоположных гранях кристалла выполнены омические контакты.



- Механизм работы диода Ганна основан на **эффекте Ганна**, который заключается в появлении произвольных электромагнитных колебаний в диоде, состоящем из полупроводника, заключенного между омическими контактами, при приложении к этим контактам напряжения

ПРИНЦИП РАБОТЫ

- Особенностью арсенида галлия и других полупроводниковых материалов, из которых изготавливаются диоды Ганна, является наличие участка отрицательной крутизны на зависимости $v(E)$



- при E более E_{nor} равномерность поля в диоде нарушается. У катода происходит накопление электронов. Область накопления электронов называют обогащенным слоем. Под действием электрического поля этот слой перемещается от катода к аноду, где и рассасывается. Процесс периодически повторяется.

ПАРАМЕТРЫ ДИОДА ГАННА

- n_0 - концентрация донорных примесей в n - области;
- l - длина n -области;
- f - «пролетная» частота;
- $f_{\text{пр}}$ - пороговое напряжение;
- $u_{\text{пор}}$ ток, соответствующий пороговому напряжению;
- $i_{\text{пор}}$ - напряжение источника питания;
- U_0 - постоянная составляющая тока.
- I_0

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИОДА ГАННА

- Существует оптимальный диапазон значений произведения концентрации донорных примесей на длину диода

При $n_0 l = (2...4) \cdot 10^{12}$ колебания тока не возникают, т. е. диод теряет свои активные свойства.

- Оптимальное напряжение источника питания, исходя из обеспечения максимума КПД, составляет

$$U_0 \cong (2.5...3) u_{\text{пор}}$$

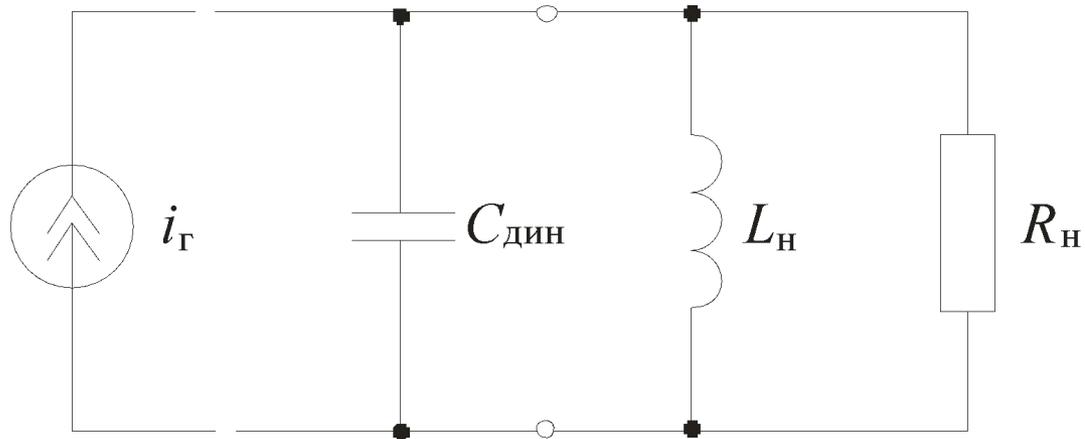
при этом

$$I_0 \cong (0.8...0.95) i_{\text{пор}}$$

ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ НА ДИОДАХ ГАННА

- Несмотря на то, что диоды Ганна генерируют колебания СВЧ даже при отсутствии колебательной системы, на практике их устанавливают в резонаторы. В результате частота колебаний автогенератора оказывается равной резонансной частоте резонатора (с учетом реактивных параметров диода). Резонансная частота колебательной системы может изменяться в пределах $\pm 40\%$.
- Применение резонаторов позволяет:
 - увеличить выходную мощность и КПД автогенератора из-за возможности обеспечения большой амплитуды напряжения на диоде;
 - настроить его на требуемую частоту и перестраивать по частоте;
 - уменьшить уровень высших гармоник в нагрузке;
 - уменьшить вероятность возбуждения колебаний на частотах, обусловленных неявными паразитными резонансами.
- Существуют различные конструкции генераторов на диодах Ганна: с волноводными, коаксиальными, волноводно-коаксиальными и другими резонаторами. Часто выполняют генераторы Ганна в микрополосковом исполнении.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА



- Для обеспечения резонанса на требуемой частоте.

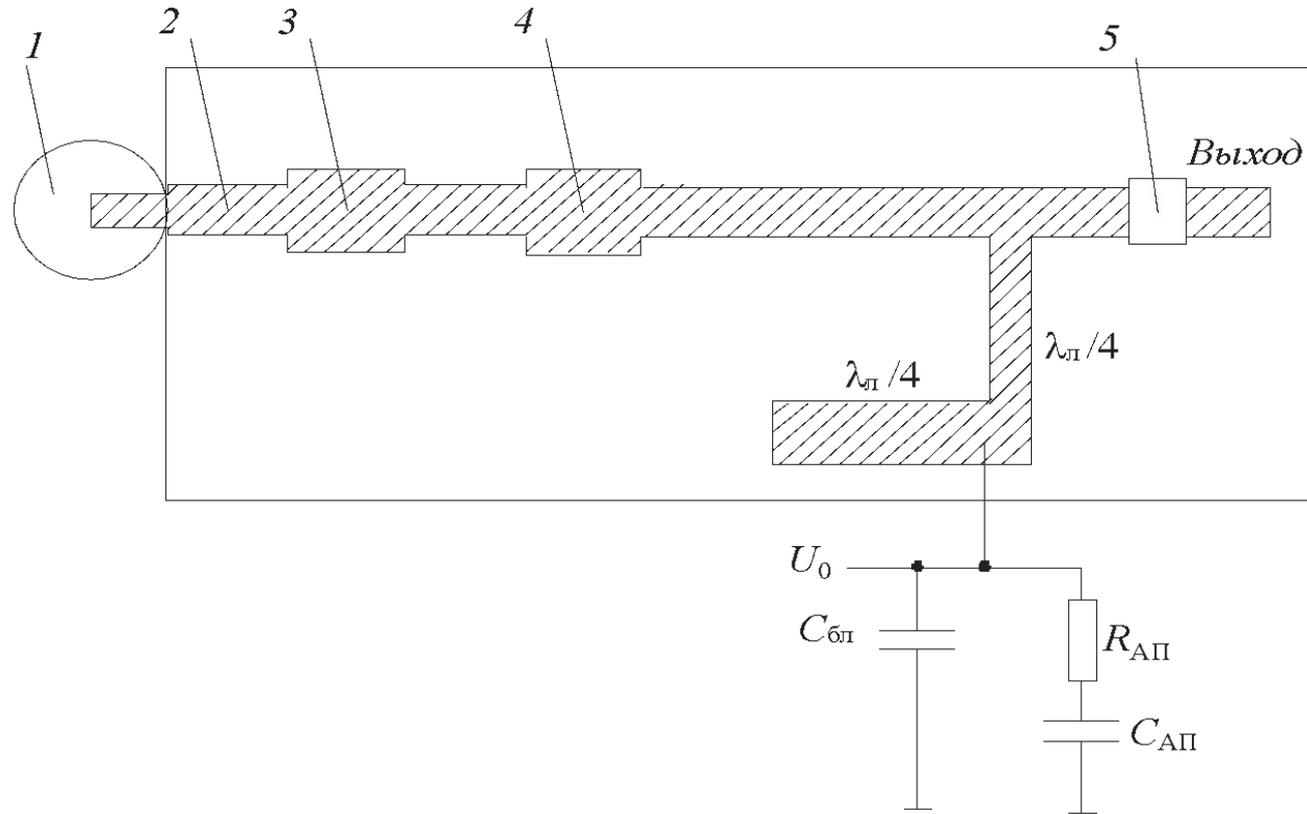
$$B_H = -1/(\omega_p L_H)$$

- Резонанс в схеме соответствует частоте $\omega_p = 1/\sqrt{C_H}$, где, $C_{\text{дин}} = (3...5) C_0$ $C_0 = \epsilon \cdot S/d$ «холодная» емкость диода, ϵ - диэлектрическая проницаемость полупроводника арсенида галлия

- сопротивление нагрузки, соответствующее максимуму КПД на частоте генерации

$$R_H = 1/G_H = (20...30) R_0$$

ТОПОЛОГИЯ ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ ГАННА



□ Характеристики генераторов:

- рабочий диапазон частот от единиц до сотен ГГц. Выходная мощность от десятков мВт до нескольких Вт в непрерывном режиме.
- КПД до 5%.