

## Введение

Отражательный клистрон<sup>1</sup>, изучению которого посвящена лабораторная работа, предназначен для генерации электромагнитных колебаний СВЧ диапазона. Исторически именно генераторы клистронного типа позволили освоить диапазоны сантиметровых и дециметровых волн, в которых традиционные электронные лампы оказались неэффективными [1].

Генерация в клистронах осуществляется за счет преобразования кинетической энергии пучка электронов, ускоренных статическим электрическим полем, в энергию сверхвысокочастотных колебаний. Для получения СВЧ колебаний пучок электронов модулируется по плотности и проводится через резонатор клистрона, в котором переменный конвекционный ток пучка возбуждает колебания.

Неоднородный электронный поток в приборах клистронного типа создается посредством так называемого динамического способа управления плотностью зарядов. При этом способе управления однородный электронный поток пропускается через переменное электрическое поле управляющего (группирующего) устройства. Переменное поле воздействует на скорости электронов в потоке, периодически ускоряя и замедляя их движение в зависимости от фазы высокочастотного поля, существующей в момент пролета электронов через управляющее устройство. Возникающее различие в скоростях электронов приводит к их группировке при последующем движении за пределами управляющего устройства. При этом в определенной точке пространства в определенный момент времени происходит образование электронного сгустка. Поток приобретает пульсирующий характер, причем электронные уплотнения и разрежения в данной точке пространства возникают с периодичностью, соответствующей частоте управляющего поля<sup>2</sup>.

Характер процесса группировки электронов, координата и время образования сгустка в клистронах определяются условиями движения вне управляющего промежутка.

В пролетных клистронах группировка происходит при движении электронов по инерции в пространстве, свободном от внешних постоянных или переменных полей; группировка становится возможной за счет того, что «быстрые» электроны догоняют «медленные», вылетевшие из управляющего промежутка раньше «быстрых».

<sup>1</sup> Название «клистрон» происходит от греческого слова «клизо», что означает береговой полупорез.

<sup>2</sup> При использовании приемов т. н. электростатического управления основной результат управления состоит в модуляции электронного потока по плотности непосредственно в области управляющего поля [2, 3].

В отражательных клистронах электроны, вышедшие из группирующего устройства, движутся в постоянном тормозящем электрическом поле. Значение этого поля таково, что все электроны, вылетевшие из управляющего устройства, возвращаются назад. Группировка в отражательных клистронах происходит благодаря тому, что «быстрые» электроны находятся в пространстве группировки дольше «медленных», и на обратном пути оказывается возможной встреча «быстрых» электронов с медленными, вышедшими из управляющего промежутка позже «быстрых».

Принципиальная схема отражательного клистрона представлена на рис 1. Функции управляющего устройства и устройства, накапливающего энергию электромагнитных колебаний в отражательном клистроне, объединены здесь в тороидальном резонаторе.

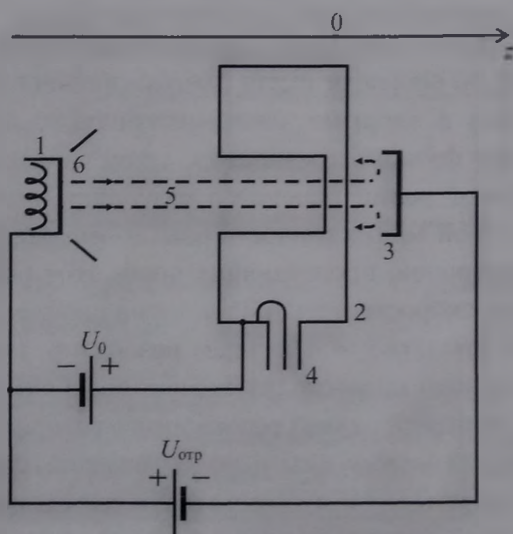


Рис. 1. Идеализированная принципиальная схема клистрона: 1 — катод, 2 — резонатор, 3 — отражатель, 4 — вывод энергии, 5 — электронный поток, 6 — управляющий электрод

Электронный поток, эмитируемый катодом, ускоряется в промежутке между катодом и резонатором, после чего первый раз попадает в зазор резонатора, образованный двумя прозрачными для потока металлическими сетками. В зазоре происходит модуляция электронного потока по скорости. После выхода из резонатора электроны движутся в тормозящем поле отражающего электрода, возвращаются назад и повторно проходят зазор. При соответствующем выборе потенциалов на электродах клистрона сгусток электронов формируется в сечении зазора резонатора в момент времени, ко-



да высокочастотное поле в зазоре тормозит возмущающиеся электроны, при этом происходит преобразование кинетической энергии электронов в энергию колебаний резонатора. Существование стационарных колебаний в клистроне оказывается возможным при компенсации потерь в резонаторе и нагрузке притоком энергии от модулированного электронного потока.

Изучим работу отражательного клистрона подробнее. Для этого сначала рассмотрим резонатор клистрона, затем обсудим модуляцию электронного потока по скорости при прохождении его через зазор резонатора, после чего разберем возбуждение резонатора первой гармоникой конвекционного тока пучка и проанализируем основные особенности работы клистрона.

## 1. Резонатор клистрона

Резонатор в клистроне выполняет две функции: служит для модуляции электронного потока по скорости и для преобразования кинетической энергии пучка электронов в энергию электромагнитного поля. Использовать для выполнения этих функций резонатор, геометрические размеры которого сравнимы с длиной волны основного колебания, возбуждаемого в них, невозможно из-за низкой эффективности взаимодействия электромагнитного поля и пучка электронов, пролетающих через этот резонатор<sup>3</sup>. Действительно, если средняя скорость электронов  $v$  значительно меньше скорости света  $c$ , то время их пролета  $t = a/v$  через резонатор, имеющий форму куба со стороной  $a$ , намного превосходит период колебания поля  $T = \sqrt{2}a/c$ . Электрон при движении через такой резонатор то ускоряется, то тормозится, поэтому обмен энергией между ним и полем незначителен. Время пролета можно уменьшить, взяв вместо куба призму с достаточно малой высотой: при неизменной низшей частоте колебаний время пролета электрона через резонатор уменьшается. Однако сокращение объема резонатора приводит к уменьшению его добротности. Использование в генераторе низкодобротной колебательной системы не позволяет производить эффективное преобразование кинетической энергии электронов в энергию электромагнитных колебаний и не обеспечивает стабильности частоты генератора.

Для увеличения объема резонатора и его добротности необходимо, оставляя длину пролетного промежутка малой, создавать дополнительные ре-

<sup>3</sup> Следует отметить, что существует способ группировки электронного потока по плотности, при котором модулируемый поток проводится через область, в которой фаза управляющего поля успевает многократно измениться за время пролета электрона. При использовании этого способа скорости электронов на выходе из управляющего поля оказываются практически одинаковыми, а электронный поток — промодулированным по плотности [3].

зервуары энергии. Именно такой резонатор используется в отражательном клистроне.

Схема резонатора представлена на рис. 2. Геометрические размеры резонатора удовлетворяют неравенствам  $a, b \ll \lambda/4$ ,  $l \ll \lambda/4$ ,  $d \ll l$ , где  $\lambda$  — длина волны, соответствующая частоте основной моды резонатора. Поскольку размеры резонатора много меньше длины волны на частоте основного колебания, резонатор можно рассматривать как колебательный контур с сосредоточенными параметрами.

При этом в резонаторе можно выделить емкостной объем, заключенный между сетками резонатора, и индуктивный объем, т.е. собственно тороидальную часть. В Приложении 1 представлен расчет индуктивности и емкости тороидального резонатора.

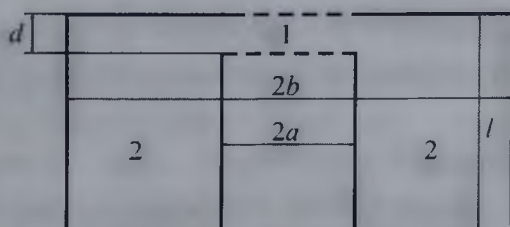


Рис. 2. Поперечное сечение тороидального резонатора: 1 — емкостной объем резонатора, 2 — индуктивный объем резонатора

При наличии потерь энергии поля в резонаторе, возникающих из-за конечной проводимости стенок и отвода мощности в нагрузку, свободные колебания резонатора являются затухающими, при этом в рамках метода комплексных амплитуд удобно вводить комплексную частоту  $\omega = \omega' + i\omega''$ . Величина  $\omega''$  может быть выражена через добротность резонатора, которая, как правило, измеряется экспериментально.

В клистродах применяются резонаторы, допускающие механическую перестройку резонансной частоты. Наиболее распространены два способа перестройки: индуктивный и емкостной. Индуктивная перестройка осуществляется введением в область магнитного поля металлических поршней, которые, уменьшая занятый полем объем, уменьшают индуктивность резонатора и тем самым повышают его резонансную частоту. Емкостная перестройка может быть осуществлена путем деформации гибкой мембраны. Сближение сеток резонатора, обеспечиваемое прогибом мембраны, ведет к увеличению емкости зазора и уменьшению резонансной частоты. Механические способы перестройки обеспечивают отстройку от основной частоты на 20–25%.



## 2. Модуляция скорости электронов в пучке

Рассмотрим процесс модуляции электронного потока по скорости. В установившемся режиме колебания в резонаторе близки к гармоническим, поле в зазоре имеет вид  $E = E_z = E_m \sin \omega t$ , где  $E_m = \frac{U_m}{d}$ ,  $U_m$  — амплитуда напряжения на зазоре,  $E_z$  — проекция электрического поля на ось  $z$ ,  $d$  — ширина зазора,  $\omega$  — частота стационарных колебаний. Найдем приращение энергии электрона, прошедшего через зазор. Кинетическая энергия, приобретаемая одиночным электроном при прохождении пути  $dz$  внутри зазора, равна работе силы электрического поля:  $dW = -e \frac{U_m}{d} \sin \omega t dz$ , где  $e$  — модуль заряда электрона (знак заряда учтен в явном виде)<sup>4</sup>. Электрон, прошедший расстояние между катодом и резонатором, имеет кинетическую энергию  $\frac{mv_0^2}{2} = eU_0$ , где  $U_0 > 0$  — потенциал резонатора относительно катода,  $v_0$  — скорость электрона,  $m$  — его масса. Отсюда при условии  $v_0 \ll c$  имеем<sup>5</sup>  $v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}$ .

При выполнении условия  $\frac{U_m}{U_0} \ll 1$  возмущения скорости  $v_0$  под воздействием высокочастотного поля незначительны. Поэтому если  $t_0$  — время прохождения электроном центра зазора, то время его нахождения в точке с координатой  $z$  есть  $t = t_0 + \frac{z}{v_0}$ . Полное приращение энергии имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_{-d/2}^{d/2} \frac{-eU_m}{d} \sin\left(\omega t_0 + \frac{\omega z}{v_0}\right) dz = \\ &= -eU_m \sin \omega t_0 \frac{\sin(\theta_3/2)}{\theta_3/2} = -eMU_m \sin \omega t_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\theta_3 = \frac{\omega d}{v_0}$  — невозмущенный угол пролета электрона через модулирующий зазор,  $M = \frac{\sin(\theta_3/2)}{\theta_3/2}$  — коэффициент взаимодействия электронного потока с полем зазора. Полная кинетическая энергия электрона, вошедшего в зазор

<sup>4</sup>Если напряжение (потенциал второй сетки относительно первой)  $U = -U_m \sin \omega t$  положительно, оно ускоряет электрон, движущийся в положительном направлении оси  $z$ .

<sup>5</sup>Пренебрежение релятивистскими поправками возможно до значений  $U_0$  порядка нескольких десятков киловольт.

с начальной скоростью  $v_0$ , на выходе из него может быть представлена в виде

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + \Delta W = eU_0 + \Delta W. \quad (2)$$

Таким образом, скорость электрона на выходе из зазора оказывается равной

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m} U_0} \left( 1 - \frac{MU_m}{U_0} \sin \omega t_0 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

При выполнении условия  $\frac{U_m}{U_0} \ll 1$  можно разложить выражение для  $v$  в ряд Тейлора и ограничиться двумя первыми членами ряда:

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m} U_0} \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{MU_m}{U_0} \sin \omega t_0 + \dots \right) \approx v_0 - v_1 \sin \omega t_0, \quad (4)$$

где  $v_1 = \frac{MU_m}{2U_0} v_0$ . Из полученного выражения видно, что скорость электрона на выходе из зазора определяется фазой поля, существовавшей в момент прохождения им центра зазора. Наибольшая амплитуда скоростной модуляции  $v_1$  достигается при стремлении коэффициента взаимодействия  $M$  к единице, что выполняется при стремлении  $\theta$ , к нулю.

### 3. Модуляция электронного потока по плотности

В пространстве между резонатором и отражателем электроны движутся в статическом тормозящем поле. Уравнение движения имеет вид  $m\ddot{z} = -e \frac{U_0 - U_{\text{отр}}}{L}$ , где  $U_{\text{отр}} < 0$  — напряжение на отражателе,  $L$  — расстояние между резонатором и отражателем. Интегрируя первый раз уравнение движения и учитывая выражение для скорости  $v$  при выходе из зазора, имеем

$$\dot{z} = v - \frac{e}{m} \frac{U_0 - U_{\text{отр}}}{L} (t - t'), \quad (5)$$

где  $t'$  — момент выхода электрона из зазора. Через  $t''$  в дальнейшем будем обозначать момент, когда тот же электрон возвращается в плоскость второй сетки. Повторное интегрирование уравнения (5) дает

$$z = v(t - t') - \frac{e}{m} \frac{U_0 - U_{\text{отр}}}{L} \frac{(t - t')^2}{2} + \frac{d}{2}. \quad (6)$$

Время пролета электрона в пространстве группировки можно найти из условия  $z = d/2$  при  $t = t''$ , откуда следует, что  $t'' - t' = 0$  и  $\frac{e}{m} \frac{U_0 - U_{\text{отр}}}{L} \times$

$\times \frac{(t'' - t')}{2v} = 1$ . Первое решение ( $t'' = t'$ ) соответствует моменту вылета электрона из зазора, второе дает время его пролета в тормозящем поле:

$$t'' - t' = \frac{2m}{e} \frac{vL}{U_0 - U_{\text{отр}}} \quad (7)$$

При выполнении условия  $U_m/U_0 \ll 1$  время пролета в зазоре определяется скоростью  $v_0$ , поэтому связь времени вылета электрона из зазора со временем его нахождения в центре зазора можно приближенно записать в виде  $t^* = t_0 + d/(2v_0)$ . Таким образом, подставляя выражение для скорости (4) в (7), получим

$$t'' = t' + \frac{2mL}{e(U_0 - U_{\text{отр}})} \left( v_0 - \frac{MU_m}{2U_0} v_0 \sin\left(\omega t' - \frac{\omega d}{2v_0}\right) \right). \quad (8)$$

Из найденного выражения видно, что время пролета электронов в пространстве группировки зависит от фазы высокочастотного напряжения, существующего в момент пролета электроном середины зазора, и от амплитуды этого напряжения.

На рис. 3 представлены примеры пространственно-временных диаграмм (зависимостей координат электронов от времени) для таких значений потенциалов на резонаторе и отражателе, при которых электроны, вышедшие из резонатора в различные моменты времени, возвращаются в него одновременно, образуя сгусток. Сверхвысокочастотное поле в резонаторе в рассматриваемых случаях в момент времени пролета сгустка максимально и является для него тормозящим. Уменьшение кинетической энергии электронов при этом приводит к возрастанию энергии СВЧ поля. Разумеется, при других значениях потенциалов на электродах клистрона сгусток может сформироваться и вне зазора резонатора, при этом эффективная передача энергии от пучка полю становится невозможной.

Домножим соотношение (8) на  $\omega$  и введем следующие величины:

$$\theta_r = \frac{2m}{e} \frac{v_0 \omega L}{U_0 - U_{\text{отр}}} \quad (9)$$

— угол пролета электрона в пространстве группировки,

$$X = \theta_r \frac{MU_m}{2U_0} \quad (10)$$

— параметр группировки. В результате получим выражение, связывающее время возвращения электрона в плоскость второй сетки ( $t''$ ) со временем



выхода электрона из зазора ( $t'$ ):

$$\omega t'' = \omega t' + \theta_r - X \sin\left(\omega t' - \frac{\theta_3}{2}\right). \quad (11)$$

Соотношение (11) является исходным для нахождения конвекционного тока пучка электронов, расчет которого приведен в Приложении 2.

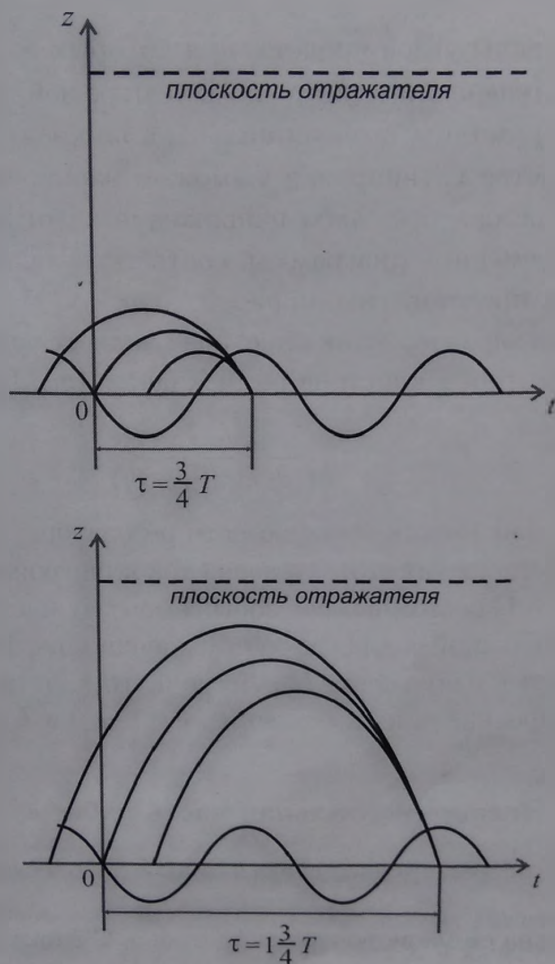


Рис. 3. Пространственно-временные диаграммы движения электронов при двух значениях оптимального времени пролета  $\tau$  в пространстве группировки ( $z = 0$  — координата, соответствующая середине зазора)



#### 4. Возбуждение резонатора клистрона током пучка

Сгруппированный электронный пучок формирует ток  $I$ , возбуждающий колебания в резонаторе (см. Приложение 3). При этом условие возбуждения клистрона принимает следующий вид:

$$\pi + 2\pi n < (\theta_z + \theta_r) < 2\pi(n + 1), \quad (12)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Указанные интервалы углов пролета, при которых возможна генерация, носят название зон генерации клистрона. В центре зон генерации, т.е. при  $\theta_r + \theta_z = 2\pi(n + 3/4)$  амплитуда максимальна, а на краях равна нулю. Угол пролета в пространстве группировки  $\theta_r$  можно варьировать, изменяя либо напряжение на резонаторе, либо напряжение на отражателе (см. (9)). Пространственно-временные диаграммы, соответствующие двум оптимальным углам пролета, представлены на рис. 3.

Одной из важных характеристик клистрона является пусковой ток — значение тока  $I_0$ , при котором клистрон возбуждается (см. Приложение 3):

$$I_{0 \text{ пуск}} = -\frac{2U_0 G}{M^2 \theta_r \sin(\theta_z + \theta_r)}, \quad (13)$$

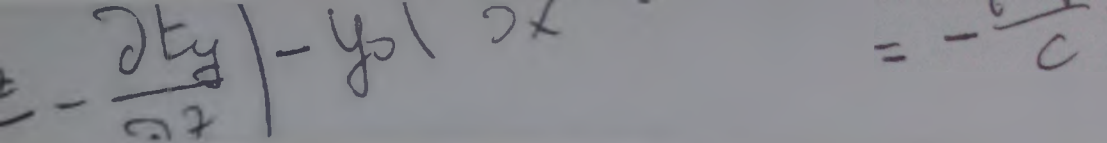
где  $G$  — действительная часть проводимости резонатора.

Как видно из соотношения (13), пусковой ток клистрона тем меньше, чем меньше величина  $G$ . С ростом номера зоны самовозбуждения клистрона облегчается. Ток, требующийся для самовозбуждения клистрона, тем меньше, чем ниже ускоряющее напряжение  $U_0$ . Легче всего клистрон возбуждается в центрах зон. Напротив, на их краях  $\sin(\theta_z + \theta_r) \rightarrow 0$  и  $I_{0 \text{ пуск}} \rightarrow \infty$ .

#### Экспериментальная часть работы

Исследуемый клистрон предназначен для работы в десятисантиметровом диапазоне.

На рис. 4 показана схема включения клистрона. С блока питания (выпрямители I, II, III) напряжение подается на отражатель, резонатор и управляющий электрод. Контроль величин напряжений на электродах клистрона осуществляется по вольтметру, последовательно подключаемому с помощью переключателя П1 к любому из электродов. К отражателю клистрона с помощью переключателя П2 может подключаться генератор пилообразного напряжения; СВЧ колебания, генерируемые отражательным клистроном, с помощью петли связи через ответвитель подводится к кристаллическому

$$-\frac{\partial E_g}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E_g}{\partial x^2} = -\frac{e}{c}$$

$$-\frac{\partial E_g}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E_g}{\partial x^2} = -\frac{e}{c}$$
$$-\frac{\partial E_g}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E_g}{\partial x^2} = -\frac{e}{c}$$
$$-\frac{\partial E_g}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E_g}{\partial x^2} = -\frac{e}{c}$$
$$-\frac{\partial E_g}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E_g}{\partial x^2} = -\frac{e}{c}$$
$$-\frac{\partial E_g}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E_g}{\partial x^2} = -\frac{e}{c}$$
$$-\frac{\partial E_g}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E_g}{\partial x^2} = -\frac{e}{c}$$



2-12

наибольшая мощность в центре зон генерации и максимальная их ширина, т.е. максимальная частотная перестройка клистрона).

б) Уменьшая амплитуду пилообразного напряжения на отражателе клистрона, получить на экране только одну зону генерации. Определить с помощью волномера ширину частотной перестройки клистрона. Для этого, изменяя настройку волномера, проследить на экране осциллографа движение метки<sup>7</sup> по зоне генерации. Зафиксировав показания волномера в крайних точках зоны, определить ширину частотной перестройки клистрона вдоль зоны генерации.

При выполнении остальных заданий переключатель П2 должен быть в положении «выкл», при этом должен быть выключен и осциллограф.

3. Снять зависимости тока в цепи детектора (ток пропорционален мощности колебаний) от<sup>8</sup>:

а) напряжения на отражателе (при нескольких фиксированных напряжениях на резонаторе),

б) напряжения на резонаторе (при нескольких фиксированных напряжениях на отражателе).

Экспериментальные данные представить в виде графиков.

Рекомендуется снятие характеристик в этом задании совмещать с измерением частотных зависимостей (см. задание 4).

4. Измерить при помощи волномера длину волны колебаний, генерируемых клистроном, и проследить, как она меняется вдоль каждой зоны. Для этого снять зависимости частоты от:

а) напряжения на отражателе (при фиксированном напряжении на резонаторе),

б) напряжения на резонаторе (при фиксированном напряжении на отражателе).

Экспериментальные данные представить в виде графиков.

5. Снять зависимость тока в цепи детектора от тока пучка для различных зон генерации клистрона. Потенциал отражателя для каждой зоны устанавливается по максимальной интенсивности колебаний (т.е. в центре зоны). Экспериментальные данные представить в виде графиков. На основании измерений определить пусковой ток клистрона для каждой зоны. Регулировку тока пучка осуществлять изменением величины потенциала на управляющем электроде.

<sup>7</sup>Появление метки (небольшого провала в мощности генерации на данной частоте) связано с резонансным характером импеданса нагрузки (волномера), изменяющей нагруженную добротность резонатора.

<sup>8</sup>При выполнении этого задания волномер должен быть расстроен.

6. Объяснить полученные экспериментальные данные.

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы отражательного клистрона.
2. Почему в приборах клистронного типа используются тороидальные резонаторы?
3. Можно ли для возвращения электронного потока в резонатор клистрона использовать не постоянное электрическое, а постоянное магнитное поле?
4. Что такое зоны генерации клистрона? Отличается ли структура поля в резонаторе для центров различных зон генерации?
5. Как изменяется крутизна частотной перестройки клистрона с изменением номера зоны и при вариации добротности резонатора?

### Литература

1. Гапонов В.И. Электроника. Ч. II. М.: Физматгиз, 1960.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Ч. II. М.: Высшая школа, 1972.
3. Костиенко А.И. Введение в электронику СВЧ. М.: Изд. МГУ, 1989.
4. Градштейн И.С., Рыжик Н.М. Таблицы интегралов, сумм рядов и произведений. М., 1963.
5. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988.