

Электрораууымным прибором называется такой электронный прибор, в котором рабочее пространство с высокой степенью разрежения, изолировано газонепроницаемой оболочкой от внешней среды, и действие которого основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе.

Различают электронные и ионные приборы. Примером ионных приборов являются неоновые индикаторные лампы (применяются в световых табло), стабилитроны, тиратроны и т.д..

Электронные лампы различают прежде всего по количеству электродов: диоды – двух-электродные лампы, триоды – трёх; тетроды – четырёх; пентоды – пяти; гексоды(6); гептоды(7); октоды - восьми электродные. Существуют, также, электронно-лучевые приборы – электронно-лучевые трубки. Например: осциллографические, радиолокационные, дисплейные, кинескопы (для телевидения) и другие.

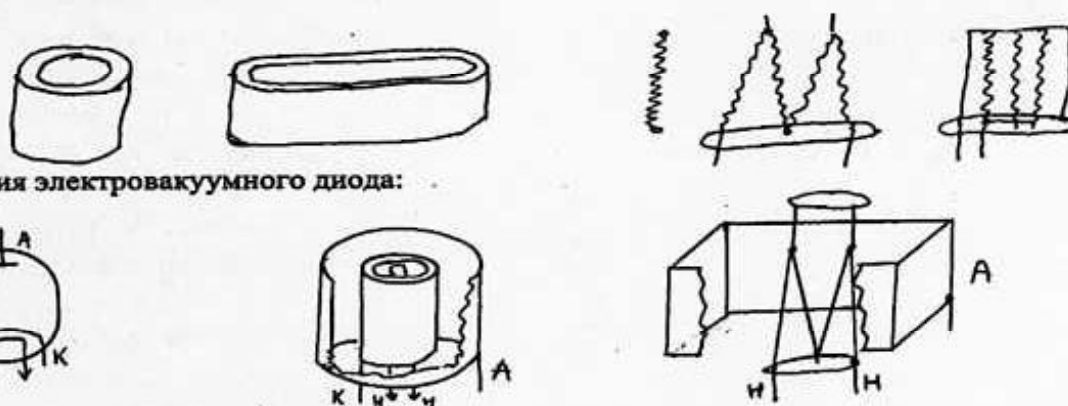
Конструкция радиоламп представляет собой герметичный баллон, с находящимися в нём электродами, внутри баллона – вакуум. Баллон может изготавливаться из стекла, металла и керамики. Выводы от электродов выполняются из специального сплава, называемого платинит, у которого коэффициент линейного расширения такой же, как у стекла. Т.к. иначе, при изменении температуры баллона, возможно нарушение герметичности лампы.

Формы и размеры ламп определяются областями их применения и их мощностью.

В настоящее время области применения радиоламп значительно сократились. Это связано с тем, что радиолампы имеют большую потребляемую мощность, низкую надёжность, маленький КПД, значительные размеры и требуют специальных мер по охлаждению радиоаппаратуры выполненной на лампах. Однако некоторые свойства радиоламп и до сих пор остаются востребованными. Радиолампы обладают большим динамическим диапазоном передачи уровня сигналов (применяются в сверхвысококачественных низкочастотных усилителях); обладают большими мощностями (применяются в мощных радиопередатчиках); имеют большую, чем у твёрдотельных приборов радиационную стойкость...

Простейшая радиолампа – диод – содержит два рабочих электрода: анод и катод, а так же подогреватель или накал для создания термоэмиссии электронов.

Термоэлектронные катоды бывают с прямым или косвенным накалом иначе – подогревные. Нить накала выполняется из вольфрама, катод из гексаборита бария, анод из тугоплавких материалов. Виды катодов и накалов:



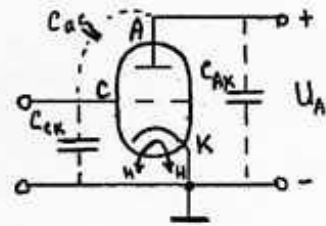
Конструкция электрораууымного диода:

Электрические параметры диода. Крутизна вольтамперной характеристики  $S = dI_a/dU_a$  при постоянной величине напряжения накала  $U_n = \text{const}$ , где  $I_a$  - ток анода,  $U_a$  напряжение анода, т.е. напряжение между катодом и анодом. Статическое сопротивление  $R_0 = U_a/I_a$ . Динамическое сопротивление (сопротивление переменному току)  $R_i = dU_a/dI_a = 1/S$ . Междуэлектродная ёмкость –  $C = \epsilon_0 Q/r_a$ , где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $Q$  - площадь электродов,  $r_a$  - расстояние между электродами, т.е. анодом и катодом.

## Триод.

Электрические параметры триода.

Крутизна анодно-сеточной характеристики  $S = dI_a/dU_c \big|_{U_a=\text{const}}$   
 Внутреннее сопротивление  $R_i = dU_a/dI_a \big|_{U_c=\text{const}}$   
 Статический коэффициент усиления  $\mu = dU_a/dU_c \big|_{U_c=\text{const}}$   
 Ёмкости: входная  $C_{ек}$ ; проходная  $C_{ас}$ ; выходная  $C_{ак}$ .



Триоды широко применялись для усиления, генерации и других манипуляций с радиосигналами. Недостатком триодов является малый коэффициент усиления. Большая проходная ёмкость (т.е. большая ёмкостная связь между входной и выходной цепями каскада на триоде) приводит к ухудшению свойств лампы на высокой частоте. Поэтому в триод была добавлена ещё одна сетка – экраниющая, которая играет роль электростатического экрана между анодом и первой или управляющей сеткой. Эта мера позволила уменьшить проходную ёмкость и улучшить свойства триода. Такая лампа называется тетродом. Введение в конструкцию радиолампы ещё одной – третьей сетки привело к появлению пятиэлектродной лампы – пентода, обладающего большим коэффициентом усиления. И, если коэффициент усиления триода был  $\mu = 1+100$ , то у пентода  $\mu = 1000+3000$ .

Однако конструктивные и технологические ухищрения не смогли беспречно увеличивать предельную рабочую частоту ламп работающих на принципе электростатического управления электронным потоком. Такой принцип управления возможен на сравнительно низких частотах, где время пролёта электронов между электродами лампы много меньше периода колебаний сигнала, поэтому можно считать, что каждый электрон перемещается в статическом электрическом поле.

В таких условиях переменное напряжение на управляющих электродах лампы будет вызывать синфазное изменение плотности электронного потока.

В СВЧ диапазоне с частотами от 300 МГц до 3 ГГц (длина волны от 1,0 до 0,1 метра) время пролёта электронов между электродами становится того же порядка или даже больше периода колебаний сигнала. Иначе говоря период колебаний меньше времени пролёта электронов.

Ухудшают частотные свойства ламп индуктивности выводов электродов, междуэлектродные ёмкости, потери в изоляционных материалах ламп. Все эти обстоятельства сильно сказываются в СВЧ диапазоне и делают практически невозможным применение радио ламп со статическим принципом управления на сверхвысоких частотах.

## Электровкуумные приборы с динамическим управлением.

Для работы на СВЧ созданы электровкуумные приборы с динамическим управлением электронным потоком, при этом время пролёта электрона через рабочее пространство может быть того же порядка или более периода СВЧ колебания.

Сущность такого управления состоит в том, что под действием переменного СВЧ поля происходит изменение скорости электронов во времени по периодическому закону. В результате из-за разницы в скоростях электронов при их движении в пространстве дрейфа (т.е. в рабочем пространстве или пространстве взаимодействия) формируются разрежения и уплотнения электронов – образуются **сгустки** – т.е. области с повышенной плотностью электронов. Этот процесс называется **модуляцией** потока электронов **по плотности**, а процесс изменения скоростей электронов из-за наличия СВЧ поля – называется **модуляцией по скорости**.

После формирования сгустков в приборах обеспечивается передача энергии от электронных сгустков СВЧ полю колебательной системы. Колебательные системы бывают узко- и широкополосные. Узкополосные системы называются **резонаторами**, а широкополосные называются **замедляющими системами**.

Электронные приборы по характеру энергообмена между электронным потоком и СВЧ полем разделяются на приборы типов “О” и “М”. В приборах типа “О” в энергию СВЧ поля преобразуется кинетическая энергия электронов, а магнитное поле в таких приборах играет вспомогательную роль либо отсутствует.

В приборах типа “М” происходит длительное взаимодействие между электронами и электромагнитными полями и в энергию СВЧ поля преобразуется потенциальная энергия электронов, которые движутся в скрещенных электрических и магнитных полях.

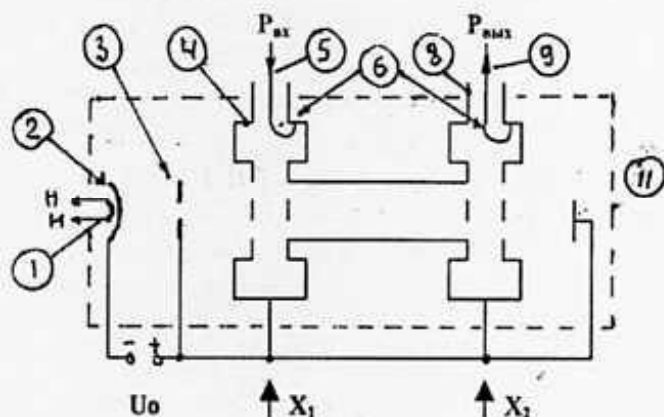
Приборы СВЧ с динамическим управлением имеют наибольшие величины усиливаемой и генерируемой мощности, высокий КПД, большие полосы пропускаемых частот и т.д..

Эти приборы занимают доминирующее положение в СВЧ технике.

### Пролётные клистроны.

Клистроны называют СВЧ электронные приборы, использующие принцип скоростной модуляции электронного потока и содержащие один или несколько объёмных резонаторов. Колебательные системы (резонаторы) у клистронов – узкополосные. Пролётные клистроны могут содержать от двух до пяти резонаторов. Назначение клистронов – усиление, генерация и умножение частоты СВЧ колебаний в диапазоне от сотен МГц до сотен ГГц, при мощностях до сотен киловатт. Изменение рабочей частоты осуществляется механически – путём изменения геометрических размеров резонаторов.

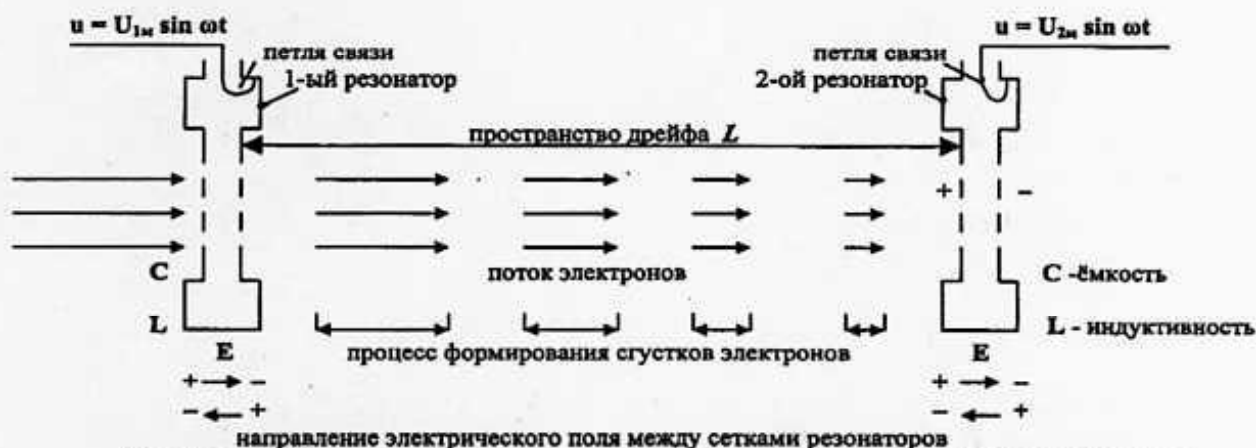
#### Двухрезонаторный усилительный пролётный клистрон.



1. накал (подогреватель),
2. катод (источник термоэлектронов),
3. управляющий электрод (ускоряющий),
4. 1-й резонатор (модулятор),
5. входной сигнал,
6. петля связи,
7. пространство дрейфа электронов,
8. 2-й резонатор,
9. выходной (усиленный) сигнал,
10.  $X_1$ ;  $X_2$  – середины резонаторов.

Электроны эмитируются (излучаются) из подогретого накалом катода и подходят к первой сетке 1-го резонатора с одинаковой скоростью невозмущенного электрона:  $V_0 = \sqrt{2eU_0/m}$ , где  $e$  – заряд электрона;  $m$  – масса электрона;  $U_0$  – потенциал ускоряющего электрода.

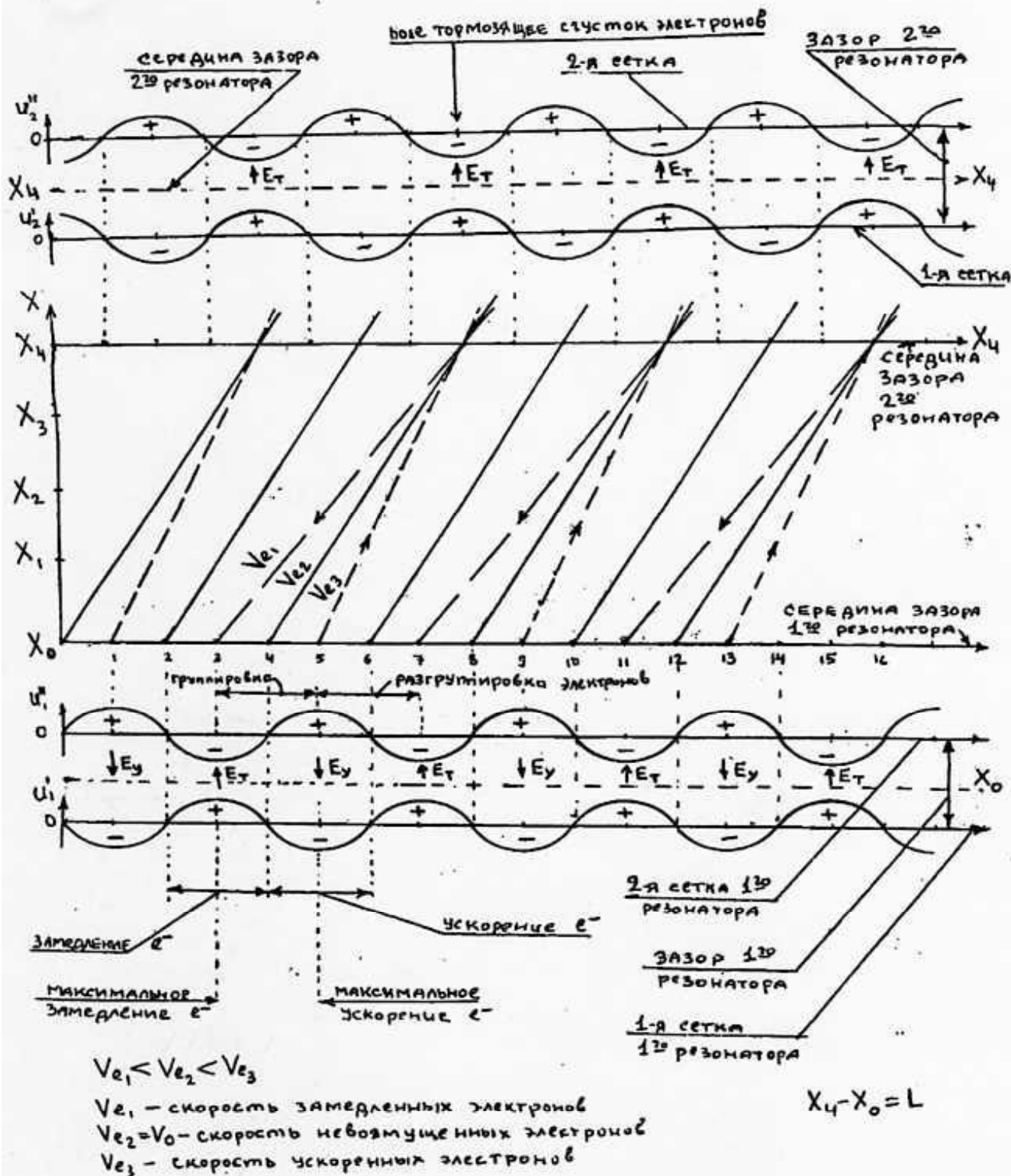
Между сетками 1-го резонатора действует переменное напряжение:  $u = U_{1m} \sin \omega t$ , где  $\omega$  – угловая частота;  $t$  – время;  $U_{1m}$  – амплитуда переменного напряжения на 1-ом резонаторе.



Во втором резонаторе поле  $E$  в момент прихода сгустка электронов должно быть тормозящим.



# Диаграмма работы пролётного клистрона.



Электроны подходят к первой сетке 1-го резонатора в виде невозмущенного (равномерного) потока. Далее электроны попадают в зазор 1-го резонатора (т.е. в промежуток между первой и второй сетками) и, если переменное напряжение входного сигнала на второй сетке резонатора положительно а на первой отрицательно, то вектор напряженности переменного поля  $E$  направлен навстречу движению электронов (поле является ускоряющим), при этом электроны за время пролёта между первой и второй сетками увеличивают свою скорость. Таким образом, 1-ый резонатор является модулятором потока электронов по скорости.

В течение второй половины периода – переменное напряжение на второй сетке становится отрицательным, при этом вектор  $\mathbf{E}$  направлен от первой сетки ко второй и электроны пролетая зазор между сетками теряют свою скорость. Таким образом, изменение скорости электронов определяется мгновенной разностью потенциалов на сетках 1-го резонатора и имеет наибольшие значения в моменты экстремумов переменного поля на сетках модулятора.

На графике движение электронов пролетевших первый резонатор представлено в виде прямых линий, тангенс угла наклона которых, к оси абсцисс, пропорционален скорости электронов.

Так электроны, пролетевшие сетки резонатора в моменты прохождения переменного напряжения через ноль (точки на оси  $X_0 - 0; 2; 4; 6; 8; 10...$ ) – продолжают движение со средней скоростью невозмущённого движения  $V_0$ , т.е. их скорость не изменяется и называются они невозмущёнными электронами.

Траектории электронов при тормозящих полупериодах (точки на графике 3; 7; 11...) составляют с осью  $X$  меньший угол – они замедляют свою скорость, а электроны, проходящие резонатор в моменты укоряющих полупериодов (точки 1; 5; 9; 13...) – увеличивают свою скорость.

В результате, в некоторый момент времени, все подвергшиеся изменению скорости электроны сближаются друг с другом и оказываются в одной и той же плоскости  $X_4$  отстоящей от плоскости  $X_0$  на расстоянии пространства дрейфа  $L$ . Напряжения  $U_0$  и  $U_{1m}$  можно подобрать таким образом, чтобы электроны встречались в середине зазора выходного резонатора. И, если, в этот момент СВЧ поле выходного резонатора является тормозящим, то происходит наибольшая передача энергии от сгустка электронов СВЧ полю.

В 1-м резонаторе передачи энергии потока электронов СВЧ полю не происходит, т.к. в этом резонаторе половина электронов ускоряется, а другая половина тормозится. В этом случае сохраняется относительный баланс энергии. Энергия источника усиливаемого сигнала (т.е. входного сигнала) почти не расходуется.

Во 2-ом резонаторе (выходном) процесс торможения электронов, т.е. отдачи ими своей кинетической энергии СВЧ полю преобладает. В результате происходит усиление СВЧ сигнала по мощности.

Помимо двухрезонаторных существуют и многорезонаторные клистроны, которые позволяют усиливать более слабые сигналы. КПД многорезонаторных клистронов достигает 40%, тогда как у двух резонаторных КПД 15 ÷ 20%.

Частотный диапазон пролётных клистронов достигает десятка ГГц. Выходная мощность в импульсном режиме - сотни киловатт.

## Лампа бегущей волны.

Лампой бегущей волны (ЛБВ) типа "О" называют такой электронный прибор СВЧ диапазона, в котором используется длительное взаимодействие сгруппированного потока электронов движущихся в продольных электрическом и магнитном полях, с прямой гармоникой сигнала, т.е. **бегущей волной**, распространяющейся вдоль замедляющей системы. Магнитное поле в приборах типа "О" играет вспомогательную роль – роль фокусирования или сжатия потока электронов.

Основное назначение замедляющей системы – уменьшить скорость распространения электромагнитной волны т.к. эффективное взаимодействие потока электронов с полем волны может быть получено только при условии приблизительного равенства фазовой скорости волны  $V_\phi$  и скорости движения электронов  $V_e$ .

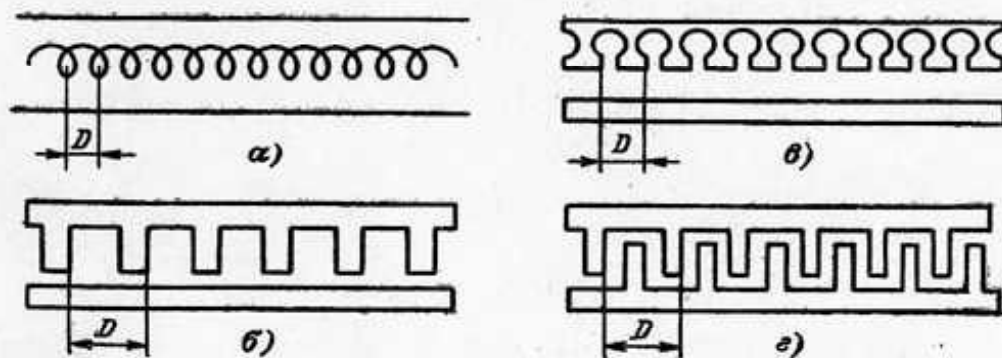
Отношение  $C/V_\phi$  – называют коэффициентом замедления системы  $K_{зам}$ .

Реально  $K_{зам} = C/V_\phi \approx \lambda/\lambda_{зам} = 3 \div 50$ , где  $C$  – скорость света;

$\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;

$\lambda_{зам}$  – длина волны в замедляющей системе.

### Конструкции или виды замедляющих систем.



**а** – спиральный проводник, находящийся в стеклянной трубке, которая помещена в электромагнитную фокусирующую систему.

**б** – гребенчатая замедляющая система.

**в** – цепочка резонаторов.

**г** – двойная гребенчатая система.

**D** – расстояние между идентичными элементами замедляющей системы называют **периодом** замедляющей структуры.

Замедление скорости волны достигается в таких линиях передачи, поверхностное сопротивление которых имеет реактивный характер. Приведенные выше типы систем удовлетворяют этому требованию.

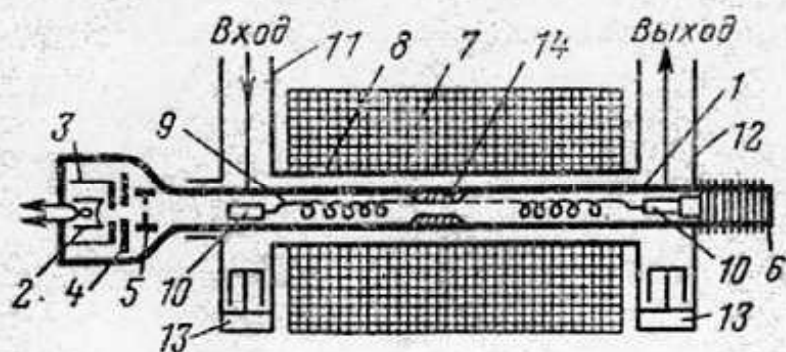
При возбуждении линии (системы) типа "а" колебаниями СВЧ, электромагнитная волна распространяется по внутреннему проводнику со скоростью близкой к скорости света  $C$ . Следовательно за время движения вдоль одного витка спирали длиной  $2\pi r$ , где  $r$  – радиус витка спирали, волна переместится вдоль оси системы лишь на величину шага спирали  $D$ . Таким образом коэффициент замедления будет равен  $K_{зам} = C/V_\phi = 2\pi r/D$ .

Фокусирующая катушка (соленоид), внутри которой находится ЛБВ, используется для окончательной фокусировки луча магнитным полем (сжатия потока электронов в поперечном сечении). Замедляющая система в виде спирали и все электроды ЛБВ заключены в длинный стеклянный баллон. К началу и концу шаг спирали постепенно увеличивается и спираль плавно переходит в два цилиндра, при помощи которых осуществляется СВЧ связь спирали со входной и выходной коаксиальной (цилиндрической) или волноводной линиями (в сечении прямоугольной или эллиптической).

Для предотвращения внутренних отражений сигнала на входе и выходе ЛБВ помещены устройства согласования лампы со внешними цепями (источником сигнала и нагрузкой).



### Конструкция и принцип действия ЛБВ.



1. Стекланный баллон.
2. Подогревной катод — источник термоэмиссионного потока электронов. Катод представляет собой цилиндр с вогнутым дном в виде сферы покрытой снаружи оксидным слоем.
3. Управляющий электрод в виде дисков или цилиндра с перегородками и отверстием в центре диска. Управляющий

электрод находится под небольшим отрицательным потенциалом и регулирует интенсивность потока электронов.

4. Первый анод. Промежуток между первым анодом и управляющим электродом представляют собой электронную линзу, осуществляющую предварительную фокусировку луча (потока электронов).

5. Второй анод. Промежуток между первым и вторым анодами – это вторая электронная линза. В результате прохождения сквозь электронные линзы поток электронов оказывается сфокусированным в узкий цилиндрический луч. Электроны в границах этого луча движутся вдоль замедляющей системы к коллектору, который находится под положительным потенциалом.

6. Коллектор.

7. Фокусирующая катушка (соленоид).

8. Металлический каркас фокусирующей катушки.

9. Спираль – замедляющая система.

10. Входной и выходной цилиндры связи между волноводами и замедляющей системой.

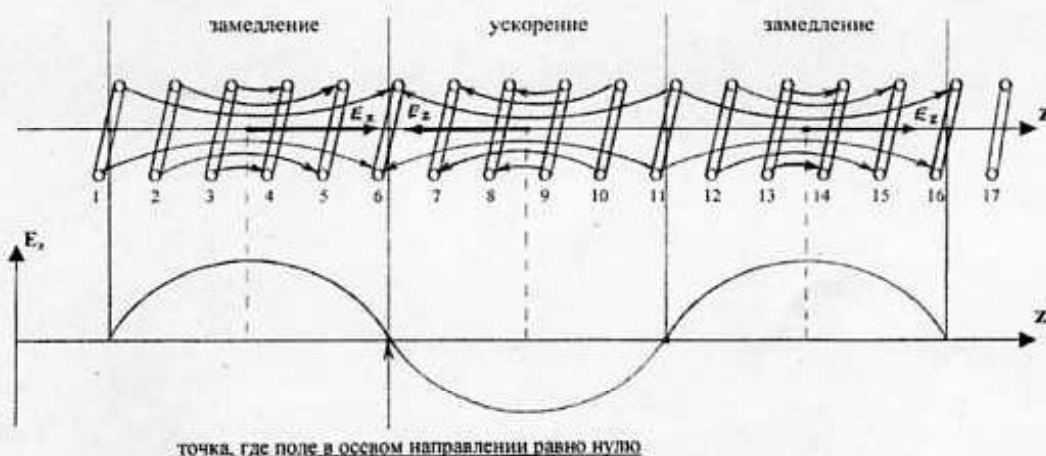
11. Входная волноводная или коаксиальная линия (Та или другая - в зависимости от частоты сигнала).

12. Выходная волноводная или коаксиальная линия.

13. Устройства согласования линий с входом и выходом лампы. В случае отсутствия согласования между ЛБВ и нагрузкой возникает отражение выходного сигнала от несогласованного выхода. Появляется обратное движение усиленного сигнала ко входу лампы, при этом может возникнуть положительная обратная связь, которая приведёт к возбуждению лампы и перехода её из усилительного режима в автогенераторный.

14. Поглотитель обратной волны – для предотвращения самовозбуждения ЛБВ.

Картина электрического поля в спиральной замедляющей системе и зависимость  $E_z = f(z)$ :



Принцип действия ЛБВ. Выше приведена упрощённая картина СВЧ поля в замедляющей системе. Вдоль оси лампы движется сфокусированный в тонкий луч поток электронов. Там где вектор  $E_z$  (напряжённости поля осевой составляющей) совпадает по направлению с вектором  $V_0$  скорости движущихся с лево на право электронов, поле для электронов – тормозящее. И наоборот, там, где вектор  $E_z$  противоположен вектору скорости  $V_0$  -поле ускоряет электроны.

Усиливаемые СВЧ колебания с входа лампы распространяются вдоль замедляющей системы образованной спиралью и каркасом фокусирующей катушки (соленоидом).

Скорость распространения электромагнитной волны вдоль провода свёрнутого в спираль, равна скорости света  $C$ . Фазовая скорость волны  $V_\phi$ , т.е. скорость её движения вдоль оси спирали в  $2\pi r/D$  раз меньше ( $r$  – радиус витка спирали;  $D$  – шаг спирали). Параметры спирали  $r$  и  $D$  выбирают такой величины, чтобы можно было обеспечить нужное замедление (10÷15 раз).

Предположим, что на входе ЛБВ имеется СВЧ сигнал с частотой  $f = \omega$ . Расстояние, на которое перемещается волна вдоль оси спирали за один период колебаний, равно длине волны  $\lambda_{\text{волны}}$ . Эта величина меньше длины волны распространяющейся в свободном пространстве в  $2\pi r/D$  раз, т.к. скорость движения волны вдоль оси спирали  $V_\phi = C2\pi r/D$ .

Обычно выбирают  $\lambda > 2\pi r$  – поэтому волна укладывается вдоль отрезка спирали содержащего значительное количество её витков.

Для получения эффективного взаимодействия электронов с волной требуется примерное равенство фазовой скорости волны и скорости электронов.

Электроны в спирали, в зависимости от фазы СВЧ электрического поля, тормозятся или ускоряются этим полем. И, из-за разности скоростей электронов, происходит группирование их в сгустки. При правильно выбранном режиме сгустки образуются в той части бегущей волны, где электроны испытывают торможение. При дальнейшем движении электроны в сгустках передают свою кинетическую энергию волне, амплитуда которой непрерывно увеличивается. На выходе лампы амплитуда волны достигает величины, значительно превышающей величину амплитуды сигнала на входе.

Процесс передачи энергии от электронного потока продолжается до тех пор, пока электроны не затормозятся волной до скорости, которая равна скорости СВЧ волны.

Параметры и характеристики усилителя на ЛБВ.

Коэффициент усиления по мощности – один из основных параметров:

$$K_p = 10 \lg P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} \text{ dB или, проще, } K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}.$$

В радиоэлектронике часто приходится иметь дело с относительными величинами (коэффициент усиления или ослабления, превышения сигнала над помехой; уровни передачи, отсчитываемые от некоторого исходного уровня и т.д.). На практике оказалось удобным вместо отношения мощностей, напряжений и токов оперировать с логарифмами этих отношений. При использовании десятичных логарифмов отношения мощностей выражают в *беллах*  $\beta_p = \lg P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ , но чаще используют в 10 раз меньшую единицу, называемую *децибелом* (dB):  $\delta_p = 10 \lg P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ , dB. Для напряжения и тока при этом получается:  $\delta_u = 20 \lg U/U_0$ , dB;  $\delta_i = 20 \lg I/I_0$ , dB.

Выходная мощность ЛБВ  $P_{\text{вых}}$  – достигает 10-ти кВт в непрерывном и 10-МВт в импульсном режимах.

Электронный коэффициент полезного действия  $\eta_p = P_{\text{вых}}/P_0$  – от 1% до 20÷30%, где  $P_0$  – вся электрическая мощность затрачиваемая на работу ЛБВ.

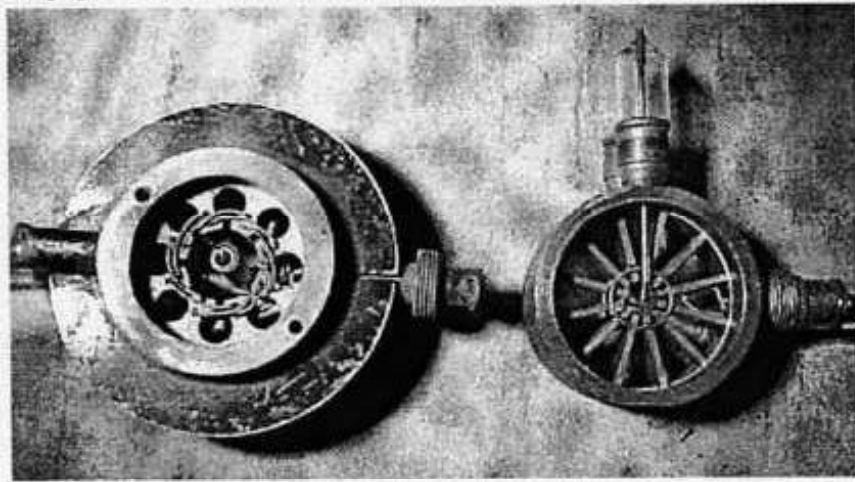
Полоса рабочих частот достигает 60% от основной частоты –  $\omega_0$ , т.е. ЛБВ – широкополосный СВЧ прибор.

ЛБВ обладает низким уровнем собственных шумов, что позволяет использовать лампу для усиления слабых СВЧ сигналов.



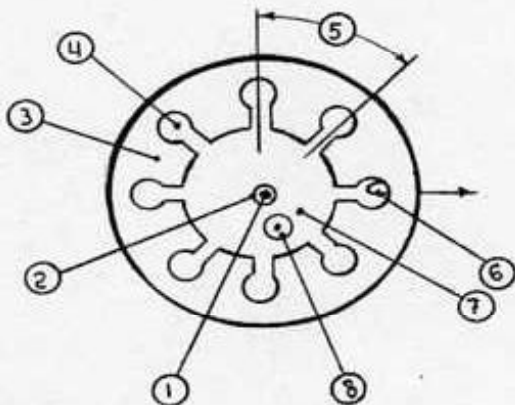
## Магнетрон.

Многорезонаторными магнетронами называются электровакуумные СВЧ приборы, в которых процесс преобразования потенциальной энергии электронов происходит в постоянных скрещенных электрическом и магнитном полях. Магнетроны относятся к СВЧ приборам типа М. Используются магнетроны в качестве узкополосных генераторов в диапазоне от метровых до миллиметровых длин волн. Энергия излучения сигнала достигает 100 кВа в непрерывном и десятков и даже сотен мегаватт в импульсном режимах. Основными достоинствами являются: высокий КПД – до 70%; относительно невысокие питающие напряжения; небольшие габариты и вес.



На фото представлены два типа конструктивного выполнения магнетронов – различие которых заключается в форме резонаторов (круглые и виде клиновидных секторов).

Для того, чтобы была видна внутренняя часть магнетронов боковые стенки у них срезаны. В левом магнетроне (в его середине) виден цилиндрический катод, а центре катода видна нить накала (подогревателя). В правых резонаторах магнетронов видны **петли связи**, с помощью которых генерируемый сигнал передаётся в нагрузку.



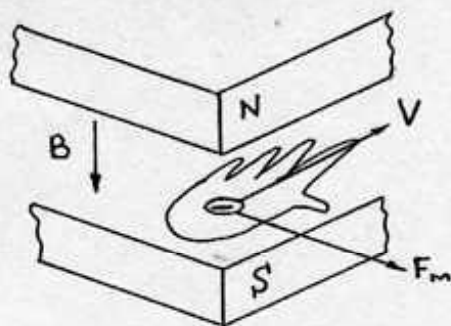
На рисунке изображена конструкция восьмirezонаторного магнетрона.

1. Накал (спираль подогревателя).
2. Цилиндрический катод (источник термоэмиссионных электронов).
3. Анодный блок – собирает отработавшие (отдавшие свою энергию) электроны.
4. Один из восьми резонаторов входящих в колебательную систему.
5. Сегмент колебательной системы.
6. Петля связи для вывода сигнала.
7. Пространство между катодом и анодным блоком - называется пространством взаимодействия.
8. Кружок с точкой - условное обозначение постоянной магнитной системы, вектор магнитного поля которой направлен из плоскости рисунка на наблюдателя (от полюса N к полюсу S). Анодный блок помещается между полюсами этой магнитной системы. Анод изготавливается в виде медного или латунного диска с резонаторами и, как правило, заземлён. Наружная поверхность блока часто выполняется в виде рёбер для улучшения охлаждения работающего магнетрона.

На анод магнетрона подаётся положительный, а на катод отрицательный потенциалы от источника питания.

При включении магнетрона начальные колебания возникают в результате флуктуаций электронного потока, а частота колебаний приблизительно равна резонансной частоте колебательной системы, хотя и отличается от неё в силу сложных взаимодействий в этой системе.

Колебательный процесс поддерживается за счёт энергии источника постоянного напряжения (источника питания).



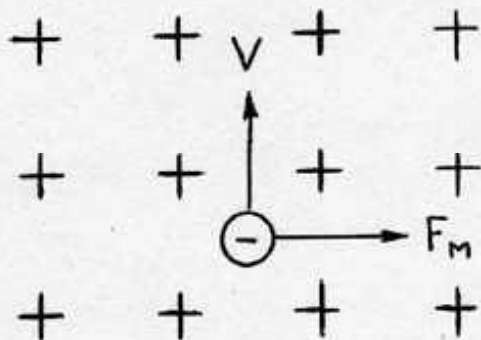
Анодный блок помещается между полюсами мощного постоянного магнита, магнитное поле которого действует на движущийся электрон по правилу правой руки.

$B$  – направление вектора магнитного поля. (Если вектор обозначен в виде “+”, то он направлен от наблюдателя в сторону плоскости чертежа).

$V$  – направление вектора скорости движения электрона под влиянием электростатического поля.

$F_m$  – направление вектора силы Лоренца – вектор нормален (перпендикулярен) к плоскости в которой расположены векторы  $V$  и  $B$ .

На движущийся в пространстве взаимодействия электрон оказывают влияние две **постоянные** силы: это а) разность потенциалов между анодом и катодом и б) постоянное магнитное поле и **переменная** сила СВЧ поля с частотой определяемой резонансными свойствами резонаторов.



#### Диаграмма движения электрона.

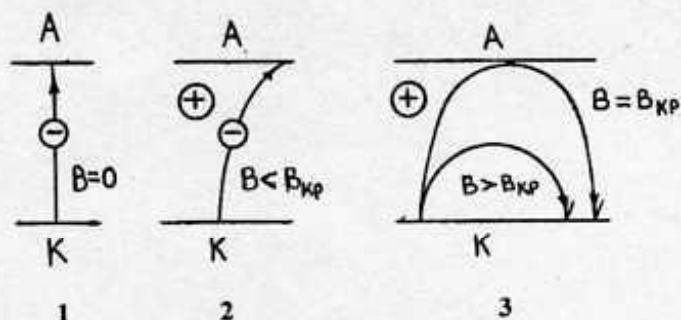
Электрон движется от катода к аноду по различным траекториям, форма которых определяется величиной силы магнитного поля  $B$ .

$F_m = q [BV]$  – сила Лоренца;

$q$  – заряд электрона;

$B$  – магнитная индукция;

$V$  – мгновенное значение скорости  $e$ .



1-я диаграмма – магнитного ( $B=0$ ) и СВЧ полей – нет, электрон движется под действием разности потенциалов между катодом и анодом.

2-я диаграмма – магнитное поле направлено от наблюдателя перпендикулярно к рисунку и его величина меньше критического значения ( $B < B_{кр}$ ).

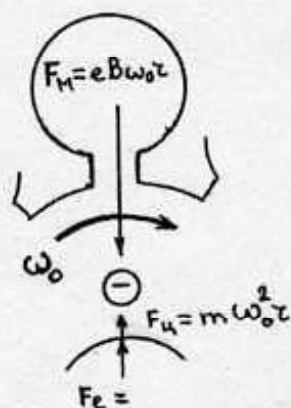
3-я диаграмма – величина магнитного поля больше критического значения ( $B > B_{кр}$ ) – в этом случае электрон сильно отклоняется в направлении действия вектора  $F_m$ , начинает возвращаться к катоду, тормозится отрицательным полем катода и отдаёт при этом часть своей энергии электрическому полю.

Таким образом, движение электронов от катода к аноду осуществляется не во всех направлениях равномерно, а лишь в некоторых областях пространства взаимодействия, образуя при этом движение так называемые спицы.

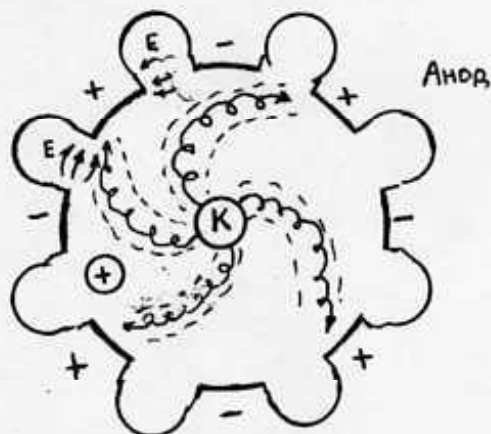
Число спиц чаще всего равно половине числа резонаторов, количество которых чётное.

Электроны в спицах движутся по сложным петлеобразным траекториям, т.к. характер их движения определяется суммарным взаимодействием постоянного и переменного электрических полей и постоянного магнитного поля.

На рисунке:  $r$  – расстояние от центра магнетрона до электрона  
 $\omega_0$  – угловая скорость вращения. На электрон действуют три силы:  $F_e$  – постоянная величина электрического поля;  $F_m$  – сила



Лоренца, возникающая при пересечении электроном силовых линий магнитного поля в соответствии с правилом правой руки. Вектор этой силы направлен к катоду;  $F_{\text{ц}}$  – центробежная сила – вектор её совпадает по направлению с вектором силы  $F_{\text{с}}$ .



Спицы образуются вблизи участков катода, лежащих против тех сегментов, которые в данный момент, благодаря наложению переменного СВЧ поля, заряжены до более положительного потенциала. А так как, с изменением фазы колебаний знаки заряда на сегментах анода меняются, то вслед за перемещением положительного заряда перемещаются и спицы, которые как бы вращаются в пространстве взаимодействия со скоростью зависящей от частоты колебаний и фазовых соотношений между полями двух соседних резонаторов. Скорость вращения спиц синхронизируется с изменением фазы СВЧ колебаний.

При сложном движении в спице на пути от катода к аноду электроны теряют часть своей потенциальной энергии, которая передаётся полю и выводится в нагрузку в виде мощного СВЧ сигнала.

Электроны, отдавшие свою энергию полю, непрерывно уходят на анод, а спицы наполняются новыми электронами с катода.

Параметры магнетрона: величина генерируемой мощности; КПД; рабочая длина волны; рабочие величины тока и напряжения питания.

Магнетроны широко применяются в радиолокаторах, в том числе в мощных радиолокаторах для дальнего обнаружения целей.

В настоящее время магнетроны нашли широкое применение в бытовых СВЧ печах.