



# Магнетроны

Магнетроном называется генераторный, вакуумный, двухэлектродный прибор СВЧ, в котором движение электронов происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях. Перед тем как ознакомиться с работой магнетрона, необходимо вспомнить законы взаимодействия электронов с электрическим и магнитным полями, чем мы в данный момент и займемся.

## Движение электронов в электрическом поле

На рис. 1 показаны три основных случая движения одиночного электрона в однородном электрическом поле, созданном двумя плоскими электродами, обозначенными как анод (+) и катод (-).

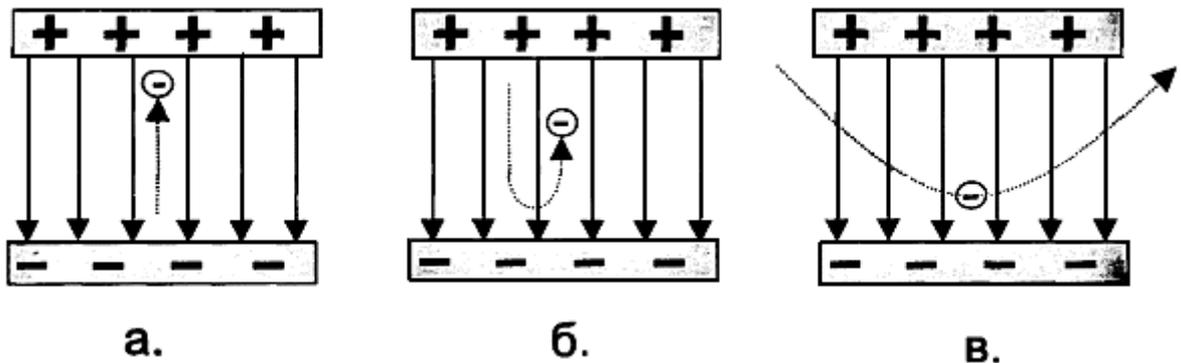


Рис. 1. Варианты движения электронов в постоянном электрическом поле

В первом случае (рис.1 а) электрон влетает в поле, отрываясь от отрицательно заряженного катода. Для такого электрона поле будет ускоряющим. Оно действует на электрон с постоянной силой и заставляет его двигаться с ускорением вдоль силовых линий поля. При этом, кинетическая энергия электрона возрастает. Если он попадает в ускоряющее поле, не имея начальной скорости, то, достигнув анода, он приобретает скорость, равную:

$$v = 6 \cdot 10^5 \sqrt{U}, \text{ м/сек,}$$

где  $U$  — напряжение между анодом и катодом.

Как видим, скорость электрона не зависит от пройденного расстояния, а определяется исключительно разностью потенциалов. Как известно, энергия не возникает из ничего. Приобретенную кинетическую энергию электрон отбирает у поля. Переместив отрицательный заряд с катода на анод, электрон снизил заряд обоих электродов и тем самым уменьшил напряженность поля между ними.

Если электрон влетает в поле со стороны анода (рис. 1.б), имея некоторую начальную скорость, то поле будет для него тормозящим. Скорость движения электрона и его кинетическая энергия в тормозящем поле уменьшаются, так как в данном случае работа совершается не силами поля, а самим электроном, который за счет своей энергии преодолевает сопротивление сил поля. Энергия, теряемая электроном, переходит к полю.

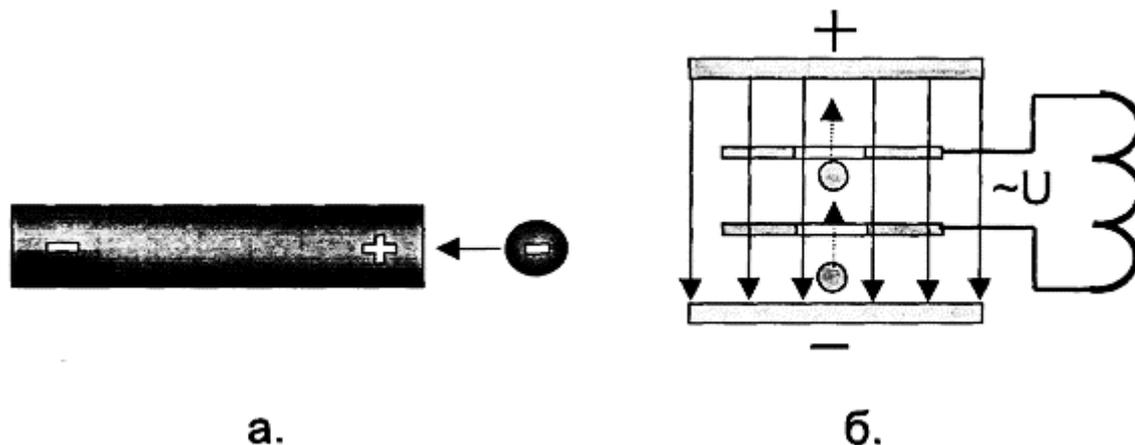
Имея достаточный запас энергии, электрон может долететь до катода, несмотря на действие тормозящих сил поля. Но если, не долетев до противоположного электрода, электрон израсходует свою кинетическую энергию, его скорость окажется равной нулю, а затем электрон будет двигаться в обратном направлении. При этом поле возвращает ему ту энергию, которую он потерял при своем замедленном движении.

Теперь рассмотрим случай, когда электрон влетает в электрическое поле, имея начальную скорость, направленную под углом к силовым линиям поля (рис. 1 в). Помимо изменения величины скорости электрона, будет изменяться и направление его движения, так что траектория движения электрона становится криволинейной. Электрон под действием сил поля отклоняется в сторону положительного потенциала.

Обычно для упрощения считают, что ток во внешней цепи вакуумного электронного прибора возникает в момент попадания электронов на анод. В действительности ток протекает и в

процессе движения электронов от катода к аноду. Чтобы это уяснить, вспомним явление электростатической индукции.

Пусть имеется электрически нейтральный проводник (рис. 2 а), к одному концу которого приближается отрицательный электрический заряд  $e$ . Тогда электроны, имеющиеся в проводнике, отталкиваясь зарядом  $e$ , сместятся в сторону удаленного конца и там образуется отрицательный заряд. На ближнем к заряду  $e$  конце получится недостаток электронов, т.е. положительный заряд.



**Рис. 2.** Возникновение наведенных токов

Процесс перераспределения зарядов есть не что иное, как электрический ток, поэтому на основании нашего мысленного эксперимента можно сделать обобщающий вывод: если отрицательный электрический заряд приближается к проводнику или удаляется от него, то в этом проводнике возникает ток, по направлению совпадающий с направлением движения заряда. В электронных приборах функцию индуктирующего заряда выполняют электроны, движущиеся от катода к аноду, а возникающий при этом ток во внешней цепи называется наведенным.

В электронике СВЧ наведенные токи очень широко используются для возбуждения колебаний в резонаторах, которые являются составной частью большинства СВЧ приборов. В качестве примера рассмотрим электрическую схему на рис. 2 б. Здесь в области между анодом и катодом помещены обкладки конденсатора с отверстием в центре, так чтобы электроны могли беспрепятственно проходить сквозь него. Во внешней цепи обкладки замкнуты на катушку индуктивности, образуя колебательный контур.

Предположим, электроны вылетают с катода поочередно по одному. Тогда первый электрон, пролетающий мимо обкладок конденсатора, вызовет во внешней цепи наведенный ток и в контуре возникнут электрические колебания. Помимо постоянной составляющей электрического поля, между обкладками появится переменная составляющая. Если после этого выпустить еще один электрон, то в интересующей нас области он либо получит дополнительное ускорение, когда переменное поле будет совпадать по направлению с постоянным, либо наоборот — замедлится в случае противоположной ориентации полей.

В последнем случае электрон отдаст часть своей энергии контуру, увеличив амплитуду его колебаний. Выпуская электроны таким образом, чтобы они каждый раз попадали в тормозящее электрическое поле контура, мы можем возбудить в нем колебания любой амплитуды, которую только обеспечивает его добротность.

Если же электроны будут влетать в пространство между обкладками в тот момент, когда там ускоряющее поле, то второй электрон погасит колебания, возбужденные первым, и дальше все будет происходить в том же духе: один электрон будет совершать работу, другой — ее уничтожать. Почти как в жизни: один человек, обливаясь потом и проклиная всеобщую грамотность, очищает лифт от надписей, второй с не меньшим упорством их восстанавливает. Оба трудятся, но, работая в противофазе, национальное богатство страны не увеличивают.

## **Движение электронов в магнитном поле**

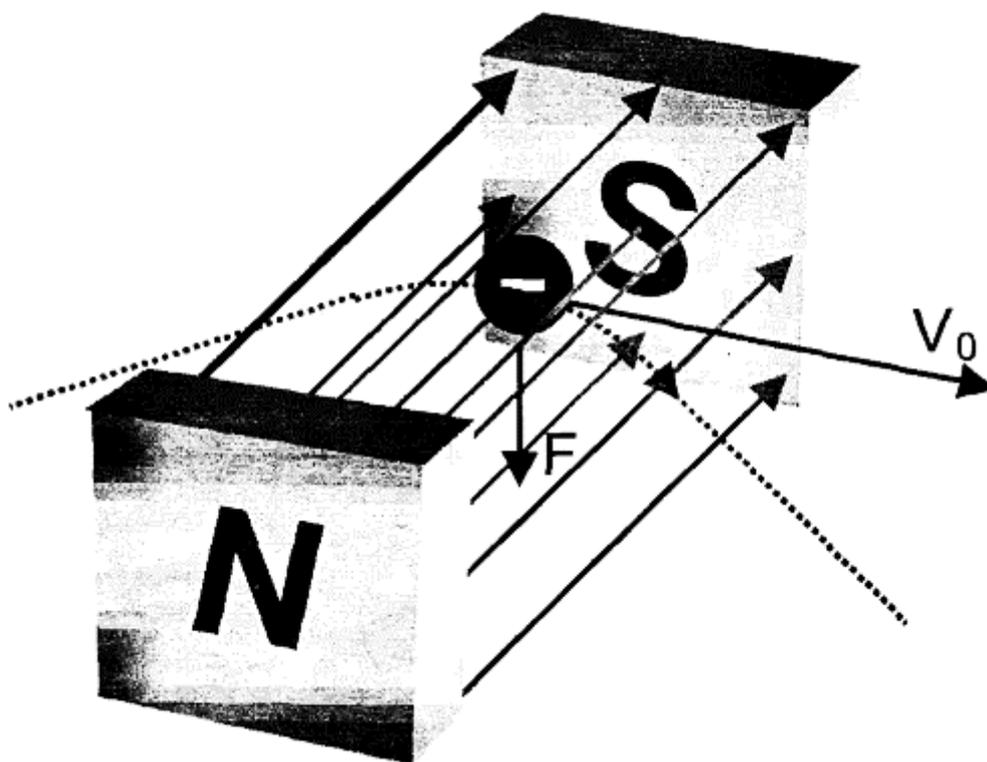
Движущийся электрон представляет собой элементарный ток и поэтому испытывает со стороны магнитного поля такое же действие, как и проводник с током. Из электротехники

известно, что на прямолинейный проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует механическая сила, направленная под прямым углом к магнитным силовым линиям и к проводнику. Эта сила пропорциональна напряженности поля, величине тока и длине проводника, а также зависит от угла между проводником и направлением поля. Она будет наибольшей, если проводник расположен перпендикулярно силовым линиям; если же проводник расположен вдоль линий поля, то сила равна нулю.

Когда электрон в магнитном поле неподвижен или движется вдоль его силовых линий, то на него магнитное поле вообще не действует. На рис. 3 показано, что происходит с электроном, который влетает с начальной скоростью  $V_0$  в равномерное магнитное поле, перпендикулярно его силовым линиям. Под действием сил со стороны магнитного поля его траектория искривляется, он начинает двигаться по дуге окружности. При этом его скорость и кинетическая энергия не изменяются. Радиус окружности, по которой движется электрон, определяется по формуле:

$$r = \frac{mV_0}{eH}$$

где  $m$  и  $e$  — масса и заряд электрона,  $V_0$  — скорость электрона,  $H$  — напряженность магнитного поля.



**Рис. 3.** Воздействие постоянного магнитного поля на движущийся электрон

### Конструкция магнетрона

Устройство магнетрона показано на рис. 4.

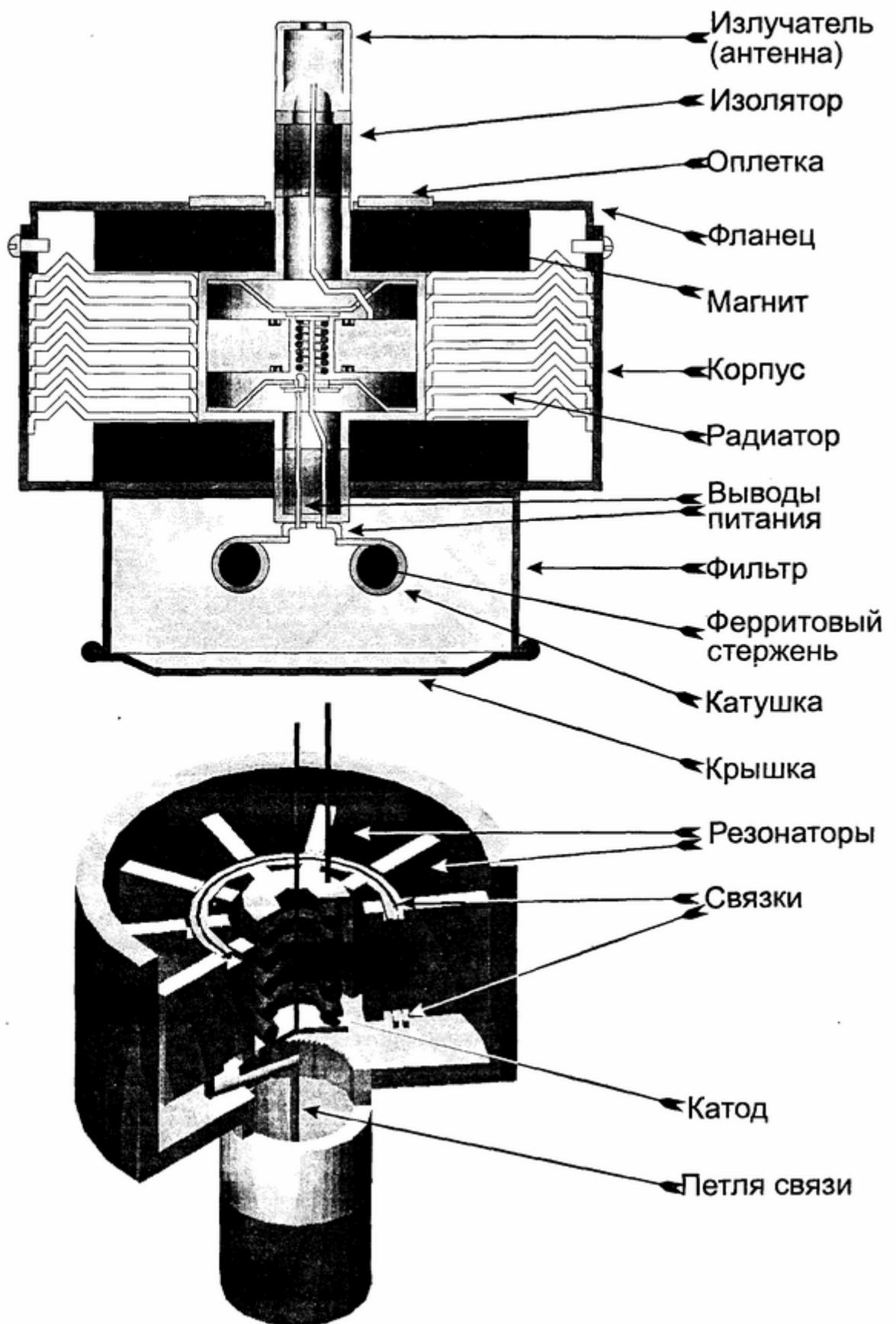


Рис. 4 Конструкция магнетрона микроволновой печи.

Он представляет собой вакуумный диод, анод которого выполнен в виде медного цилиндра, на внутренней стороне которого расположено четное число резонаторов. В магнетронах для микроволновых печей их, как правило, десять. Форма резонаторов может быть различной, но при этом они должны обладать следующими качествами:

1. Электрическое поле преимущественно сосредоточено в зазоре резонатора.
2. Все резонаторы сильно связаны между собой.
3. Высокая добротность.

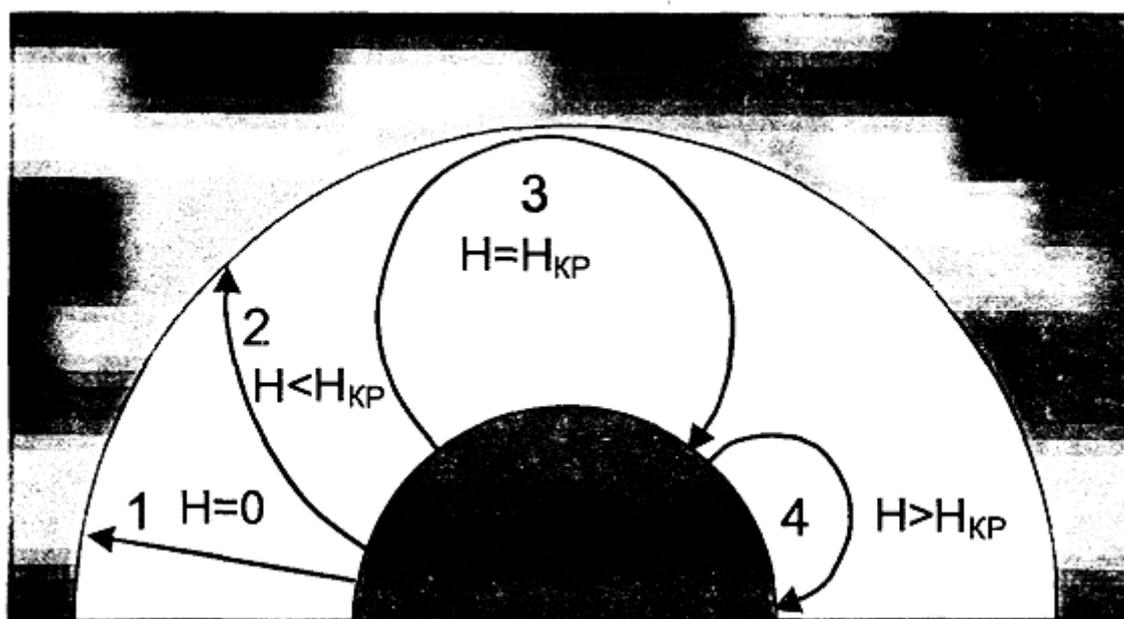
В дальнейшем для простоты мы будем рассматривать только одну конструкцию магнетрона, которая типична для микроволновых печей. Резонаторы в этом случае представляют собой секторы цилиндра. По сравнению с другими конструкциями эта более технологична и более экономична.

Четные и нечетные перегородки между резонаторами соединены между собой связками, назначение которых мы выясним позже. Катод представляет собой спираль из вольфрама, поверхность которого имеет шероховатость для увеличения эмиссии. Выводы катода через металлокерамический переход и высокочастотный фильтр подключаются к внешнему разъему. Промежуток между анодом и катодом, называемый пространством взаимодействия, с торцов ограничен металлическими пластинами, препятствующими выходу электронов и СВЧ поля из этого пространства. Для отбора энергии вблизи одного из резонаторов подключена магнитная петля связи, которая через отрезок коаксиального волновода соединена с излучателем. Магнитное поле в пространстве взаимодействия создается двумя кольцевыми постоянными магнитами и магнитопроводом, в качестве которого служат корпус и фланец.

Для более интенсивного охлаждения магнетрона анодный блок окружен радиатором. Для снижения паразитного излучения в месте соединения магнетрона с внешней цепью имеется металлическая оплетка. СВЧ фильтр состоит из катушек индуктивности на ферритовом сердечнике и проходных конденсаторов.

## Принцип действия магнетрона

Рассмотрим вначале движение электронов в магнетроне, предполагая, что колебаний в резонаторах нет. Для упрощения изобразим анод без резонаторов (рис. 5), как будто их забыли сделать.



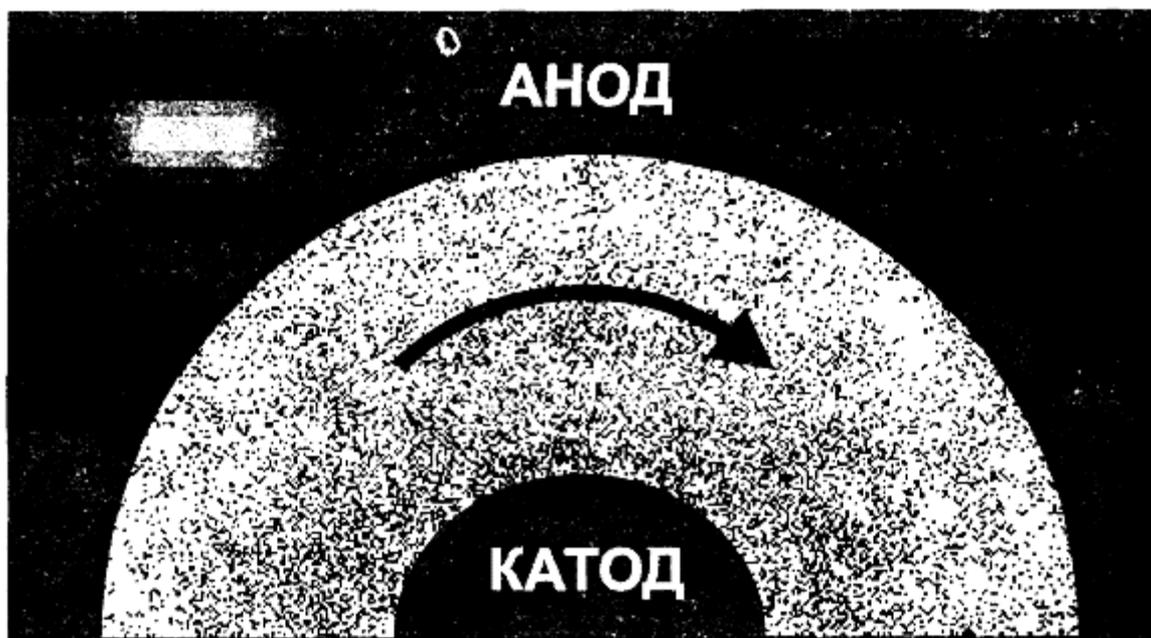
**Рис. 5.** Движение электронов в пространстве взаимодействия при различной индукции магнитного поля

Под влиянием ускоряющего электрического поля электроны стремятся лететь вдоль его силовых линий, т.е. по радиусам от катода к аноду. Но как только они набирают некоторую скорость, постоянное магнитное поле начинает искривлять их траектории. Так как скорость электронов постепенно нарастает, то радиус этого искривления постепенно увеличивается.

Поэтому траектория электронов представляет собой не дугу окружности, а более сложную кривую — циклоиду.

На рисунке показаны траектории электронов, вылетевших с катода с ничтожно малой начальной скоростью при разной напряженности магнитного поля  $H$ . Анодное напряжение во всех случаях одно и то же. Если магнитное поле отсутствует, то электрон летит строго по радиусу (траектория 1 на рисунке). При напряженности поля, меньшей некоторого критического значения  $H_{кр}$ , электрон попадает на анод по криволинейной траектории 2. Критическая напряженность поля соответствует более искривленной траектории 3. В этом случае электрон пролетает у самой поверхности анода, почти касаясь ее, и возвращается на катод. Наконец, если поле выше критического, то электрон еще более круто поворачивает обратно (кривая 4).

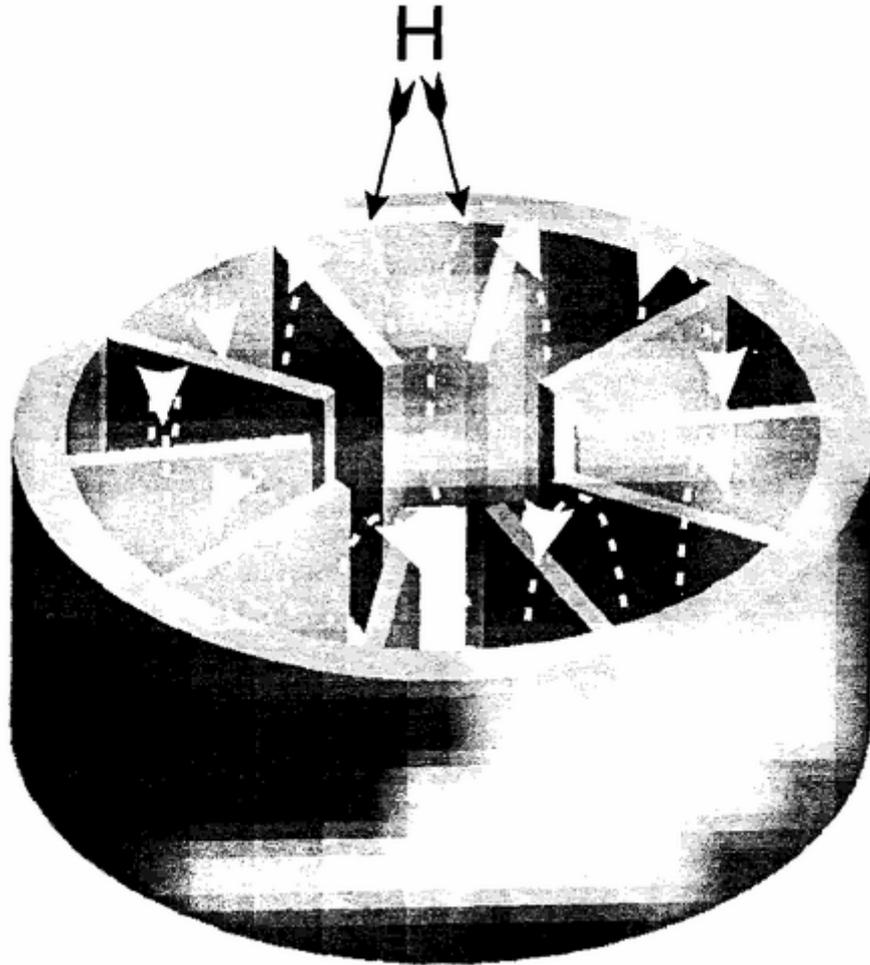
Магнетроны работают при напряженности поля, несколько большей критической. Поэтому электроны при отсутствии колебаний пролетают близко к поверхности анода на различных расстояниях от него в зависимости от начальной скорости. Поскольку одновременно движется очень большое количество электронов, можно считать, что в пространстве взаимодействия вращается электронное облако в виде кольца (рис. 6).



**Рис. 6.** Вращающееся электронное облако в пространстве взаимодействия

Скорость вращения электронного облака зависит от приложенного напряжения и поэтому может регулироваться. Чтобы при ее увеличении электроны не попадали на анод, одновременно необходимо увеличивать и напряженность магнитного поля.

Теперь вернем на место наши резонаторы. Все они сильно связаны между собой, так как магнитное поле каждого из них замыкается, проходя через смежные резонаторы (рис. 7).



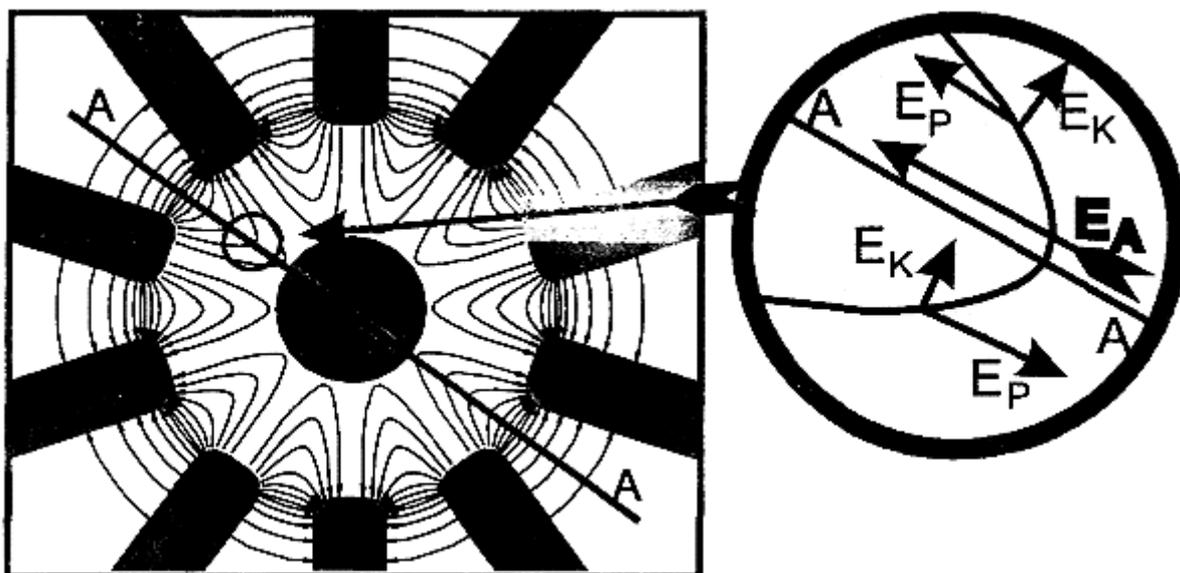
**Рис. 7.** *Связь между резонаторами магнетрона с помощью магнитного поля*

Переменное электрическое поле в магнетронных резонаторах сосредоточено в области щели, причем значительная его часть проникает в область взаимодействия, что имеет принципиальное значение в работе магнетрона. Движение электронного облака в пространстве взаимодействия будет наводить токи в резонаторах.

Однако в начальный момент увеличение амплитуды колебаний будет сдерживаться тем, что движение электронов не синхронизировано, и в то время, как одни электроны будут возбуждать колебания, отдавая им часть своей кинетической энергии, другие будут эти колебания гасить. Кроме того, если сдвиг фаз в соседних резонаторах не синхронизирован со скоростью электронов, то один и тот же электрон, отдавая энергию одному резонатору, будет ее тут же отбирать у другого.

Обычно для нормальной работы магнетрона требуется, чтобы фазы соседних резонаторов были смещены на  $180^\circ$ , т.е. на  $\pi$  радиан. Поэтому такой вид колебаний называется  $\pi$  — видом. Чтобы способствовать возбуждению этого вида и препятствовать возбуждению остальных, в магнетроне используются металлические связи, которые электрически соединяют между собой четные и нечетные резонаторы.

Предположим, что в какой-то момент времени в резонаторах случайным образом возникли колебания нужного нам вида (рис. 8). Попытаемся доказать, что при правильно заданных режимах магнетрона эти колебания будут усиливаться за счет автоматической группировки электронов.



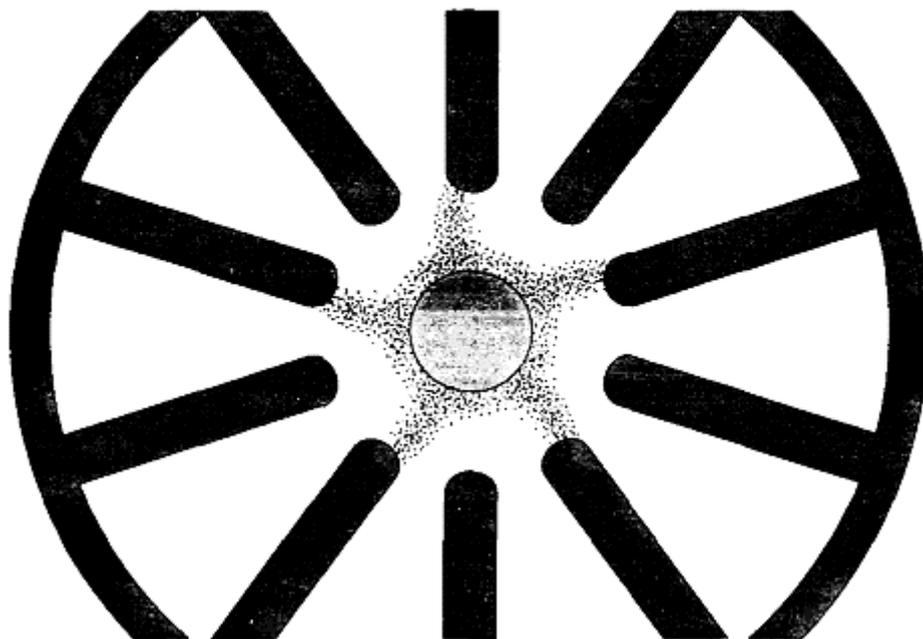
**$E_r$**  - радиальная составляющая СВЧ поля  
 **$E_k$**  - касательная составляющая СВЧ поля  
 **$E_a$**  - поле, созданное анодным напряжением

**Рис. 8** Распределение силовых линий переменного электрического поля в пространстве взаимодействия

В любой точке пространства взаимодействия мы можем рассматривать СВЧ поле как сумму двух составляющих: радиальной — направленной по радиусу от центра магнетрона, и перпендикулярной ей касательной составляющей. Рассматривая рис. 8, можно заметить следующую характерную особенность: во всем пространстве, находящемся под отрицательным сегментом, радиальная составляющая поля направлена к катоду, а во всем пространстве под положительным сегментом она направлена к аноду (поле считаем направленным в ту сторону, куда движется электрон под действием этого поля). Границами, разделяющими эти пространства, являются плоскости, проходящие через ось магнетрона и середины щелей.

Обозначим одну из таких плоскостей буквами АА. Слева от этой плоскости радиальная составляющая будет ускорять электроны, поскольку она совпадает по знаку с постоянным анодным напряжением. Так как под влиянием магнитного поля направление скорости изменяется, то через некоторое время увеличение скорости в радиальном направлении превращается в увеличение скорости по направлению к плоскости АА.

Поэтому электроны, находящиеся под положительным сегментом, догоняют электроны, находящиеся в плоскости АА. Электроны, находящиеся под отрицательным полюсом, тормозятся радиальной составляющей СВЧ поля, поэтому их скорость в направлении движения электронного облака снижается. В результате образуются области электронных скоплений, по форме напоминающие спицы колеса, как это показано на рис. 9. Эти спицы вращаются с такой скоростью, чтобы за половину периода проходить расстояние от одной резонаторной щели до другой.



**Рис. 9.** Форма вращающегося электронного облака в работающем магнетроне

В этом случае электроны, находящиеся в спицах, пролетая над щелями резонаторов, могут постоянно попадать в тормозящее поле касательной составляющей и отдавать ему энергию, накопленную во время движения по радиальной составляющей. Таким образом, основная роль касательной составляющей СВЧ поля заключается в преобразовании кинетической энергии электронов в энергию колебаний, а основная роль радиальной составляющей заключается в преобразовании равномерного электронного облака в колесо от телеги.

Рассмотрим более подробно движение отдельного электрона в двух случаях: когда он находится в спице и когда он вне ее. Как уже отмечалось, при отсутствии СВЧ поля электрон, вылетевший с катода со скоростью, равной нулю, совершит круг почта вблизи анода и вновь вернется на катод. Причем скорость в конце пути будет той же, что и в начале, т.е. в нашем случае нулевой.

При наличии СВЧ поля возможны два случая:

**1.** Допустим, электрон находится в области спицы. Тогда, вылетев с катода, он будет разгоняться анодным напряжением и за счет магнитного поля постепенно изменять направление движения. Влетев в тормозящее СВЧ поле, он отдаст ему часть своей кинетической энергии, и его скорость снизится. В результате ему не хватит оставшейся энергии, чтобы долететь обратно до катода. В какой-то момент он остановится, а затем вновь начнет движение к аноду под воздействием анодного напряжения. Все предыдущие процессы повторятся, за исключением того, что точкой начала движения будет не катод. В этом же духе будут происходить и последующие циклы, пока в конце концов электрон не доберется до анода. Таким образом, электрон на пути к аноду проходит по сложной траектории (рис. 10) несколько раз, отдавая свою энергию СВЧ полю.



**Рис. 10** Траектория электрона, находящегося в «спице», при движении от катода к аноду

**2.** Возможен, однако, и другой случай. Если при прочих равных условиях электрон вылетел с катода в момент, когда он находился между спицами, то он попадет в ускоряющее СВЧ поле, и поэтому ему после правого разворота в магнитном поле вполне хватит энергии врезаться в катод. Избыток кинетической энергии выделится в виде тепла, приводя к дополнительному разогреву катода.

### **Характеристики магнетронов**

Основными параметрами магнетронов являются: рабочая частота, выходная мощность, коэффициент полезного действия (КПД), рабочие токи и напряжения. Частота магнетронов для микроволновых печей составляет 2450 МГц. Отклонение от этой частоты в ту или иную сторону может быть вызвано изменением анодного напряжения или параметрами нагрузки. Величина смещения частоты составляет несколько мегагерц. Мощность магнетронов лежит в пределах от 500 Вт, до 1 кВт, а КПД составляет от 50% у электронных динозавров до 85% в наиболее удачных конструкциях. Анодный ток магнетронов для микроволновых печей обычно составляет 250 — 300 мА.

В практике эксплуатации магнетронов широко пользуются графическими рабочими характеристиками, позволяющими в зависимости от конкретных условий установить требуемые значения мощности и КПД. Типичные рабочие характеристики приведены на рис. 11. По вертикальной координатной оси отложены значения анодного напряжения, по горизонтальной оси — значения анодного тока.

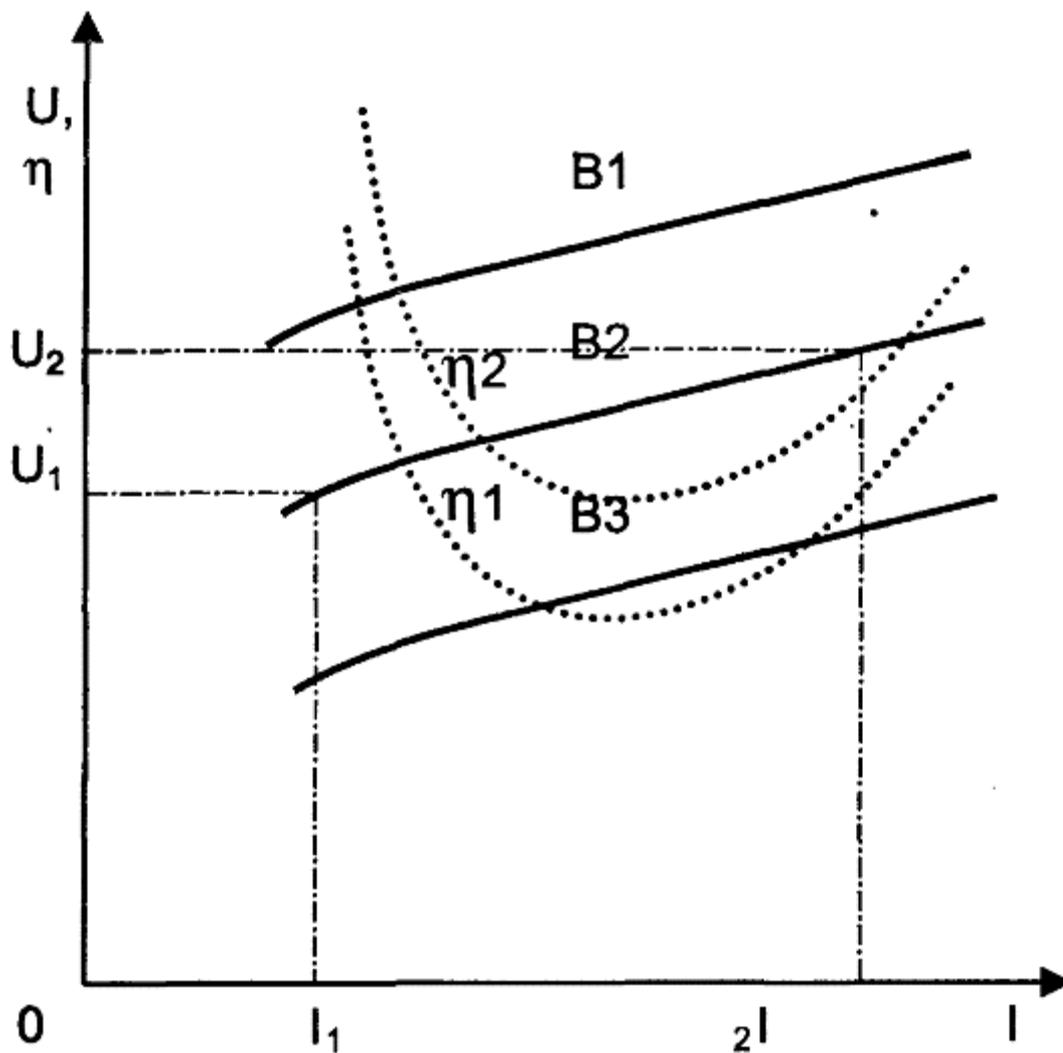


Рис. 11. Рабочие характеристики магнетронов

Для выражения взаимной зависимости нескольких параметров магнетрона на рабочие характеристики наносят ряд кривых, вдоль которых одна из представляемых величин остается неизменной. Эти кривые называются соответственно линиями постоянной мощности, КПД и магнитной индукции. На рисунке линии постоянной индукции сплошные, линии постоянного КПД — пунктирные.

Если изменять напряжение на магнетроне от значения  $U_1$  до  $U_2$ , оставляя неизменной магнитную индукцию B3, то рабочая точка, определяющая режим работы магнетрона, будет перемещаться вдоль линии постоянной индукции. Вследствие слабого наклона линий постоянной индукции при этом будет наблюдаться сильное изменение тока, протекающего через магнетрон (от  $I_1$  до  $I_2$ ).

Из характеристик видно, что в пределах одной линии постоянной индукции ток изменяется практически от нуля до своего максимального значения при относительно небольшом изменении анодного напряжения. Поэтому на практике режим работы магнетрона удобнее контролировать не по напряжению на магнетроне, а по анодному току.

В областях очень малых и очень больших токов магнетрон работает неустойчиво: в области малых токов наблюдается низкая стабильность частоты магнетрона, а в области больших токов возможно появление «искрения» — кратковременных электрических пробоев внутри магнетрона, приводящих к быстрому разрушению катода.

КПД магнетрона возрастает при одновременном увеличении анодного напряжения и магнитной индукции, если при этом не нарушаются условия синхронизма. КПД магнетрона напрямую зависит от потерь, которые происходят двумя путями. Часть мощности теряется потому, что некоторые электроны прибывают на анодный блок магнетрона с большими скоростями и тратят свою энергию на его нагрев. Вследствие этого магнетрон разогревается до

высокой температуры и необходимо принимать специальные меры для его охлаждения. Другая часть мощности теряется в резонаторах магнетрона, так как в них возникают СВЧ токи большой силы. Для снижения этих потерь необходимо повышать добротность резонаторов. Существуют и некоторые другие виды потерь, но их удельный вес невелик.