

ственно за антенной, как это показано, например, на рис. 455. На этом рисунке видно, что открытый конец волновода помещен в фокусе рефлектора.

Литые металлические зеркала—антенны больших радиотелескопов, рассчитанных на прием сантиметровых волн,—имеют диаметр 10—15 м, причем внутренняя поверхность их отличается от идеального параболоида не более чем на 1 мм.

## § 98. Радиолокация. Генерирование ультракоротких волн (клистроны и магнетроны)

Отражение ультракоротких (метровых и сантиметровых) волн от препятствий, встретившихся на пути их прямолинейного, лучевого распространения (§ 91), используют в радиолокации для определения местоположения крупных предметов, скрытых в темноте, в тумане или за облаками. Радиолокационные передатчики и приемники [радиолокаторы <sup>1)</sup>], установленные на кораблях и самолетах, позволяют водителям кораблей и самолетов видеть на экране очертания незримого берега, рельеф местности, другие корабли и самолеты. В годы войны радиолокаторы сыграли большую роль при защите от внезапных нападений с моря и воздуха.

Радиолокационные сигналы, подаваемые с аэродрома, предотвращают аварии при посадке самолетов в условиях плохой видимости. Сигналы радиомаяков помогают пилотам устанавливать правильный курс самолетов при полном отсутствии видимости <sup>2)</sup>.

Высокая чувствительность радиолокационных приемников и большая мощность генераторов позволили еще в 1946 г. провести успешный опыт приемов сигналов, отраженных от поверхности Луны.

Радиолокационные установки работают преимущественно на дециметровых и сантиметровых волнах. Антенны радиолокационных установок обеспечивают острую направленность излучения. Излучающая антенна служит вместе с тем и для приема отраженных волн. Излучение производится к р а т к о в р е м е н н ы м и и м п у л ь с а м и: волны излучаются сериями продолжительностью каждая серия в миллионные доли секунды; одна серия излучаемых волн отделена от другой излучаемой серии паузой порядка тысячной доли секунды. Во время пауз производится прием отраженных волн. Мгновенная мощность излучаемых волн значительна (десятки и сотни киловатт), но так как продолжительность

<sup>1)</sup> От лат. locus—место.

<sup>2)</sup> На трассе движения пассажирских самолетов устанавливается много десятков, иногда сотни радиомаяков. При полете летчик проворачивает «переключатель карт», в котором каждая карта имеет перфорированные отверстия, расположенные по особому коду так, что приемник самолета автоматически настраивается на волну радиомаяка, находящегося в центре местности, обозначенной на карте. Пилот видит на экране спроектированное на экран изображение карты, а также силуэт своего самолета над тем местом, над которым он находится в данный момент. Имеются также приборы, которые осуществляют автоматическое управление самолетом для сохранения заданного курса.

пауз в тысячи раз превышает периоды излучения, то в итоге средняя мощность радиолокационного передатчика невелика (десятки — сотни ватт). Передвижные радиолокаторы легко обнаруживают самолет или корабль на расстоянии десятков километров, а более мощные стационарные — на расстоянии 150—300 км. Волны, отраженные от столь дальних предметов и принимаемые обратно радиолокатором, имеют ничтожную мощность, порядка  $10^{-12}$ — $10^{-14}$  вт. Приемники радиолокатора дают громадное усиление (порядка  $10^{12}$  раз), которое обеспечивается многокаскадными усилителями промежуточной частоты. В моменты, когда радиолокатор излучает серии волн, высокочувствительный приемник радиолокатора автоматически закорачивается разрядом, который возникает в газоразрядной лампе, подключенной к линии, соединяющей передатчик и приемник с антенной («переключатель» в блок-схеме радиолокатора, рис. 456).

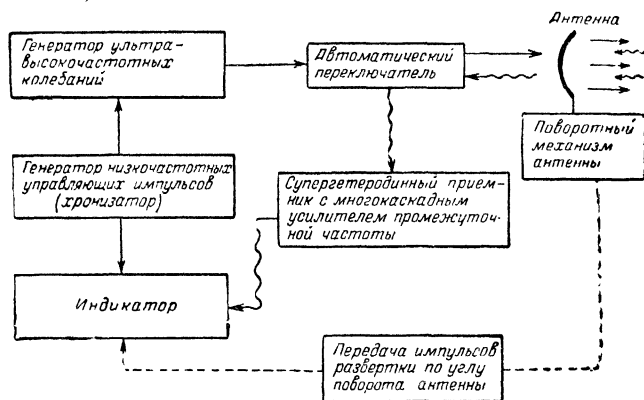


Рис. 456. Блок-схема радиолокатора.

Прерывность работы генератора ультракоротких волн вызывается периодическими импульсами, которые вырабатываются хронизатором; эти импульсы служат также для развертки изображения в индикаторе. Основной частью индикатора является особая электронно-лучевая трубка. Электронный луч в ней развертывается по одному из направлений импульсами хронизатора (т. е. смещения луча пропорциональны времени, что соответствует для приема отраженных волн дальности предмета, отразившего волны). Прямая, по которой производится развертка электронного луча по времени (по дальности отразившего волны предмета), не остается на экране индикатора неподвижной, но перемещается, воспроизводя своими перемещениями поворотные движения направленной антенны радиолокатора. На управляющий электрод индикаторной трубки подается отрицательное постоянное напряжение такой ве-

личины, что электронный луч при отсутствии радиосигнала оказывается запертым и экран остается темным. Радиосигнал, создаваемый серией отраженных и вновь принятых радиолокатором волн, подвергается многократному усилению в приемнике, детектируется и подается на тот же вышеупомянутый электрод индикаторной трубки, где он создает положительный импульс напряжения. Это обеспечивает проникновение электронного луча к экрану, и на экране появляется светлое пятно, положение которого показывает дальность предмета, отразившего волны, и угол направления на этот предмет.

В радиолокаторах, приспособленных для кругового обзора, электронный луч, следуя импульсам хронизатора, движется по радиусу экрана, и эта радиальная развертка по времени (и дальности) вращается вокруг центра экрана синхронно с вращением направленной антенны локатора.

Благодаря неодинаковому отражению ультракоротких волн почвой и водой радиолокаторы позволяют отчетливо видеть береговую линию (рис. 457).

Для генерирования электрических колебаний ультравысоких частот в радиолокаторах применяют *клизтроны*<sup>1)</sup> и *магнетроны*. В этих приборах колебательные контуры заменены объемными металлическими резонаторами (*эндовибраторами*), электроемкость и индуктивность которых мала, а поэтому частота собственных колебаний велика (рис. 458).

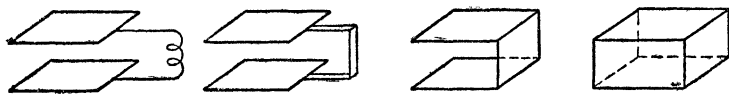


Рис. 458. Переход от резонансного контура к объемному резонатору.

На рис. 459 представлена схема *двухконтурного клизтрона*. В этой своеобразной электронной лампе имеются два объемных резонатора, обладающих вращательной симметрией относительно общей оси, вдоль которой происходит движение электронного пучка, создаваемого подогревным катодом. Ближайший к катоду резонатор называют *группирователем*, второй резонатор — *улавливателем*. Между этими двумя резонаторами, как бы заменяющими сеточный и анодный колебательные контуры, установлена обратная



Рис. 457. Изображение береговой линии на экране радиолокатора. Черное — вода. Справа видна группа из 4 кораблей и 3 корабля в гавани.

<sup>1)</sup> От греч. *kliiso* — *разбиваю*.

связь, осуществленная в виде коаксиальной линии ( $L$ ). Электроны, эмитированные катодом, ускоряются до некоторой одинаковой для всех электронов скорости в поле, которое создается постоянным напряжением  $V_a$  между катодом и первым резонатором, и в поле управляющей сетки  $C$ . Через отверстия в стенках резонатора (группирователя) прикрытые сетками электроны попадают в полость этого резонатора и выходят в пространство между резонаторами, которое называют *пространством дрейфа* ( $D$ ). Электрическое поле в группирователе (и накрывающих

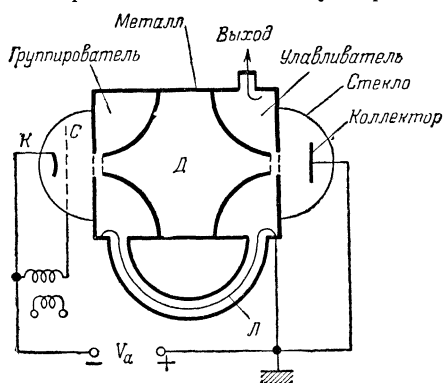


Рис. 459. Схема клистрона.

отверстия в этом резонаторе) является высокочастотно-переменным. Поэтому, если в некоторый момент времени электроны, проходящие

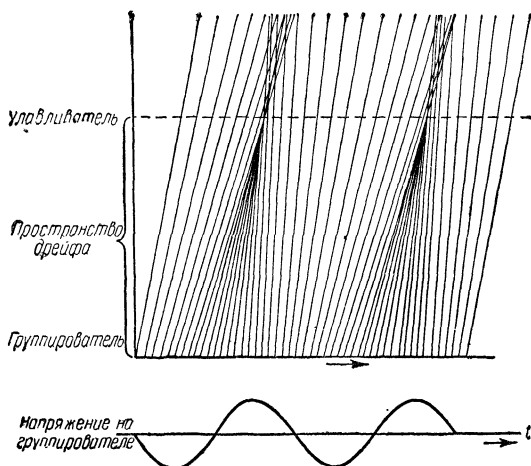


Рис. 460. Диаграмма, поясняющая возникновение электронных сгустков в клистроне.

это поле группирователя, получают большое ускорение, то в последующий момент времени другая группа электронов, пересекающая тот же резонатор, уже не получит этого ускорения. Таким образом, в пространстве дрейфа, где электроны движутся по инерции, сохраняя неодинаковые скорости, полученные в группирователе, одна группа электронов будет нагонять другую группу. В связи с

этим на некотором расстоянии от группирователя будут периодически возникать повышенные концентрации электронного потока — «электронные сгустки». У правильно рассчитанных и хорошо сконструированных клистронов именно здесь, где происходят наиболее резкие изменения концентрации электронного потока, и помещается второй резонатор — улавливатель; в стенках его имеются отверстия, пропускающие электронный поток к электроду, замыкающему цепь, — к *коллектору*. Диаграмма, поясняющая движение электронов в пространстве между группирователем и улавливателем, представлена на рис. 460; тангенс угла наклона прямых в этой диаграмме указывает скорость, полученную электронами в группирователе; расстояние между прямыми характеризует концентрацию электронов в потоке.

Очевидно, что *электронные сгустки, пересекающие полость улавливателя, эквивалентны импульсам высокочастотного тока*. Эти импульсы тока и н д у ц и р у ю т в полости и в стенках улавливателя быстропеременную электродвижущую силу, т. е. возбуждают электромагнитные колебания, которые благодаря резонансу могут достигнуть большой интенсивности. По закону Ленца индуцированное поле в любой момент времени будет *т о р м о з и т ь* электроны; таким образом, некоторая часть той кинетической энергии, которая была сообщена электронам в ускорительном поле, преобразуется в улавливателе в энергию электромагнитных колебаний.

Электромагнитные колебания в улавливателе передаются в волновод или же в двухпроводную линию, которая на рис. 459 обозначена словом «выход». Но часть энергии этих колебаний через линию обратной связи возвращается группирователю, что и обеспечивает (при правильном расчетном соотношении фаз колебаний) самовозбуждение колебаний в клистроне. Амплитудная модуляция этих высокочастотных колебаний производится подкачей импульсов модулирующих колебаний на управляющую сетку *S*.

На рис. 461 показана схема часто применяемых *отражательных (одноконтактных) клистронов*. Здесь функции группирователя и улавливателя совмещены в одном резонаторе. Электроны, ускоренные постоянным напряжением  $V_a$ , проходя быстропеременное поле резонатора, приобретают в разные моменты времени неодинаковые скорости. По выходе из резонатора они попадают в тормозящее их электрическое поле электрода-*отражателя*, имеющего значительный отрицательный потенциал относительно катода. Это

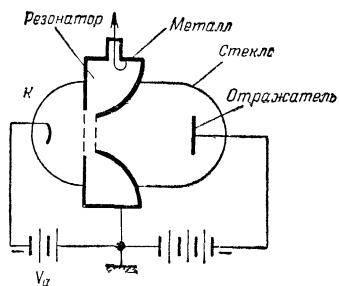


Рис. 461. Схема отражательно-го клистрона.

поле отбрасывает электрон обратно в резонатор. Благодаря неодинаковым скоростям электроны проникают на неодинаковы е р а с т о я н и я к отражателю и поэтому в неодинаковые моменты времени возвращаются в резонатор. Это при правильном соотношении путей, проходимых электронами, и приложенных напряжений приводит к образованию электронных сгустков в потоке электронов, возвращающихся к резонатору. Электронные сгустки индуцируют в резонаторе быстропеременное электромагнитное поле, что при резонансном совпадении частот и правильном соотношении фаз и приводит к самовозбуждению колебаний в клистроне.

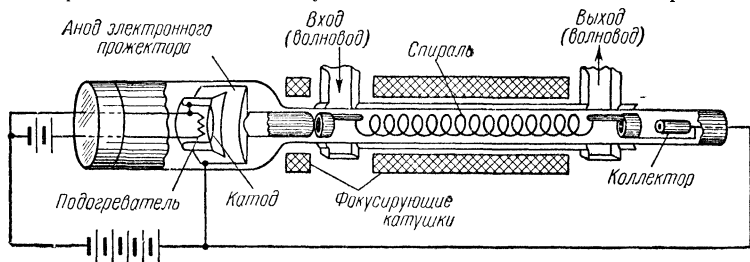


Рис. 462. Схема электронной лампы с бегущей волной.

Расчленение однородного электронного потока на электронные сгустки и индуцирование возникающими таким образом импульсами тока быстропеременного поля являются основным процессом не только в клистронах, но и в усилительных ультравысокочастотных *электронных лампах с бегущей волной*. Схема такой лампы показана на рис. 462. Электронный прожектор создает в этой лампе тонкий электронный луч, направленный по оси проволочной спирали в продольном магнитном поле, которое препятствует расширению луча. Ультракороткие волны подводятся к спирали по волноводу и распространяются в лампе со скоростью, которая для передачи электрического импульса по спирали близка к скорости света; следовательно, *поле волны перемещается по оси лампы со скоростью, во столько раз меньшей скорости света, во сколько раз длина витка спирали превышает шаг спирали*. Аноду электронного прожектора сообщают такое напряжение, чтобы электроны приобретали примерно ту же скорость, с какой перемещается по оси лампы поле волн. Очевидно, что быстропеременное поле волн должно ускорять электроны в одних частях луча и тормозить электроны в других частях луча. Вследствие этого электронный луч становится неоднородным по концентрации электронов — в нем образуются электронные сгустки. Электронные сгустки как изменения величины тока индуцируют в витках спирали электрические колебания, которые усиливают подведенные к лампе колебания; при этом электронные сгустки тормозятся индуцированным полем, так что эффект

усиления колебаний создается в итоге за счет энергии, сообщаемой электронам в прожекторе. Создав обратную связь между концами спирали, можно вызвать самовозбуждение колебаний в лампе и использовать лампу с бегущей волной как генератор ультракоротких волн.

В настоящее время наиболее мощными генераторами ультракоротких волн являются *магнетроны*. Магнетрон представляет собой особый вид хорошо эвакуированной электронной лампы с накаливаемым катодом и с электронным потоком, который управляется одновременно электрическим и магнитным полями. На рис. 463

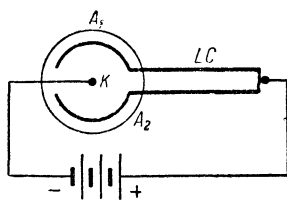


Рис. 463. Схема магнетрона.

дана схема простейшего двухсегментного магнетрона (в разрезе, перпендикулярном к оси катода  $K$ ). В этом магнетроне цилиндрический анод разрезан на две части  $A_1$  и  $A_2$ , замкнутые накоротко проводником с небольшой распределенной самоиндукцией  $L$  и емкостью  $C$ . Лампа помещается в постоянное магнитное поле, параллельное оси анода (т. е. перпендикулярное к плоскости чертежа). В отсутствие магнитного поля электроны, эмитируемые катодом, двигались бы прямолинейно по радиусам к поверхности анода. Магнитное поле искривляет траекторию электронов. При достаточно большой напряженности магнитного поля траектории большей части электронов становятся замкнутыми и ток через лампу резко уменьшается. Самовозбуждение колебаний в магнетроне происходит при напряженности магнитного поля, близкой к этой критической величине. Вследствие случайного начального толчка, приводящего магнетрон к самовозбуждению, напряжение на сегментах анода оказывается

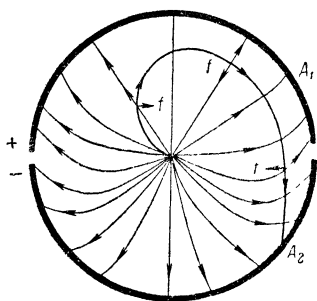


Рис. 464. Картина электрического поля в магнетроне.

неодинаковым. Допустим, что потенциал сегмента  $A_1$  несколько выше, чем сегмента  $A_2$ , так что сегмент  $A_1$  является в рассматриваемый момент времени в некоторой степени электроположительным по отношению к  $A_2$ . Симметрия радиального электрического поля анода будет этим несколько нарушена. Важно, что у щелей между сегментами анода линии поля окажутся выгнутыми, как показано на рис. 464; на этом рисунке стрелками показано направление электрических сил, действующих на

электроны. Деформация электрического поля у щелей такова, что электроны, двигавшиеся (вследствие завихрения, созданного магнитным полем) параллельно поверхности анода, будут испытывать у (правой на рис. 464) щели торможение и, утратив часть

своей кинетической энергии (отдав ее в виде энергии индуцированного или электромагнитного поля), окажутся отброшенными на сегмент  $A_2$ , что увеличит электроотрицательность этого сегмента по отношению к  $A_1$ . На рис. 464 приведена траектория одного из таких электронов, причем стрелками  $f$  указано отклоняющее действие магнитного поля.

Понятно, что увеличение разности потенциалов между анодными сегментами  $A_1$  и  $A_2$  будет продолжаться недолго и прекратится, как только большая часть электронного тока окажется замкнутой на сегмент  $A_1$  (вследствие более интенсивного поля этого сегмента). Тогда потенциал этого сегмента упадет и сегмент  $A_1$  окажется электроотрицательным по отношению к  $A_2$ . Теперь возникнет торможение электронов у противоположной щели, и электроны будут отбрасываться на сегмент  $A_1$ , что усилит электроотрицательность сегмента  $A_1$  по отношению к  $A_2$ . Торможение электронов у щели опять будет сопровождаться преобразованием кинетической энергии электронов в энергию излучаемого электромагнитного поля.

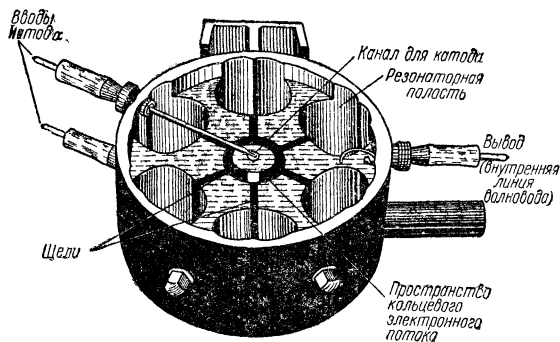


Рис. 465. Анодный блок шестикамерного магнетрона.

Частота самовозбуждающихся колебаний в магнетроне определяется электрическими параметрами ( $L$  и  $C$ , а стало быть, размерами и формой) полуанодов и замыкающей их цепи. Для повышения частоты колебаний увеличивают число сегментов и придают разрезному медному аноду такую форму, что сегменты замыкаются стенками объемных резонаторов (рис. 465).

При использовании магнетронов в радиолокаторах, когда излучение производится кратковременными импульсами со значительными паузами (что существенно улучшает условия охлаждения сильно нагревающихся электродов), импульсная мощность магнетронов, генерирующих волны длиной в несколько сантиметров, достигает тысяч киловатт.