****

**Инж. А. И. Иоффе.**

**В 3 нашего журнала за 1946 г. был описан клистрон специальный электроннолучевой прибор, служащий для генерирования сверхвысоких частот. Его работа основана на принципе фазового фокусирования электронногопотока.**

**В помещаемой ниже статье рассматривается принцип работы и описывается устройство другого специального электронного прибора магнетрона, используемого также для генерирования сверхвысоких частот.**

\* \* \*

Для получения дециметровых и сантиметровых волн в настоящее время широко применяются передатчики с магнетронами. Схемы с магнетронами дают возможность получать электромагнитные волны длиною до нескольких сантиметров при мощности колебаний от долей ватта до сотен киловатт.

|  |
| --- |
| http://www.chipinfo.ru/literature/radio/194608_9/img/20.jpg |
| *Рис. 1. Схема магнетрона: 1 — стеклянный баллон лампы, 2 — анод, 3 — катод, 4 — катушка электромагнита* |

Что такое магнетрон? Это электронная лампа с двумя рабочими электродами: анодом и катодом. Управление электронным потоком осуществляется в нем не электрическим полем, как в обычной электронной лампе с управляющей сеткой, а магнитным полем.

Электрическая схема простейшего магнетрона представлена на рис. 1.

Из рисунка видно, что магнетрон имеет цилиндрический анод, внутри которого расположен прямолинейный катод. Снаружи лампы устанавливается катушка электромагнита таким образом, чтобы силовые линии ее магнитного поля были параллельны осям катода и анода.

Возбуждение электрических колебаний магнетроном может быть представлено так: с катода, накаливаемого специальным источником постоянного или переменного тока, вылетают электроны. Под влиянием ускоряющего поля анода, находящегося под положительным потенциалом, электроны направляются к аноду. При отсутствии постороннего магнитного поля электроны, вылетающие с катода, беспрепятственно достигают анода. В этом случае электроны летят к аноду прямолинейно по радиусам (рис. 2, а). При прохождении тока через катушку электромагнита появляется магнитное поле. Пути электронов под влиянием магнитного поля искривляются. Чем сильнее магнитное поле, тем больше искривляются пути летящих к аноду электронов (рис. 2, б и 2, в). При дальнейшем усилении магнитного поля, достигаемого увеличением тока, протекающего по катушке электромагнита, пути или траектории электронов настолько сильно искривляются, что электроны, не долетая до анода, возвращаются на катод (рис. 2, г). В этом случае прохождение анодного тока через магнетрон прекращается. Искривление траектории электрона вызывается воздействием на него магнитного поля.

|  |
| --- |
| http://www.chipinfo.ru/literature/radio/194608_9/img/21.jpg |
| *Рис. 2. Пути электронов в магнетроне под влиянием магнитного поля.* |

Таким образом электрон, вылетающий с катода, попадает на анод по сложному, криволинейному пути. Время, в течение которого электрон проходит этот путь, сравнимо с периодом колебаний. Это имеет существенное значение, так как при определенных величинах магнитного поля и анодного напряжения возникают колебания сверхвысокой частоты, период которых сравним с временем пробега электрона к аноду.

Частота таких колебаний зависит от величин, напряженности магнитного поля и анодного напряжения Ua и от диаметра анода магнетрона.

Меняя напряженность магнитного поля и анодное напряжение, можно в известных пределах изменить длину волны и мощность генерируемых колебаний. Следует помнить, что для возбуждения колебаний не обязательно иметь регулируемое по величине магнитное поле, а, определив его наивыгоднейшую для данного случая величину, сделать его постоянным.

Это дает возможность применять вместо электромагнитов постоянные магниты.

Мы рассмотрели здесь простейший тип магнетрона со сплошным анодом. Для облегчения возникновения колебаний аноды магнетронов обычно разрезаются вдоль оси на отдельные сегменты. Применяются магнетроны с двумя, четырьмя, шестью, восемью и более сегментами. При этом число сегментов обычно берется четное, хотя : принципиально магнетрон может работать и при нечетном числе сегментов.

Схематическое изображение магнетронов с 2, 4 и 6 сегментами приведено на рис. 3.

|  |
| --- |
| http://www.chipinfo.ru/literature/radio/194608_9/img/22.jpg |
| *Рис. 3. Аноды магнетрона с различным числом сегментов* |

Отдельные сегменты анода соединяются в параллель, при этом получаются два вывода для присоединения колебательного контура; последний выполняется в виде удлиненной дуги из проволоки. или шинки красной меди; концы дуги подсоединяются к выводам; сегментов анода. Анодное напряжение подается к средней точке дуги. Для изменения длины волны параллельно концам дуги присоединяется конденсатор переменной емкости. Антенна (например, полуволновый диполь) связывается с колебательным контуром индуктивно симметричной фидерной линией или высокочастотным кабелем.

Такое устройство дает возможность отнести антенну от колебательного контура и поднять ее над передатчиком для получения большей дальности действия. Принципиальная схема передатчика дециметровых волн с 4-сегментным магнетроном приведена на рис. 4.

|  |
| --- |
| http://www.chipinfo.ru/literature/radio/194608_9/img/23.jpg |
| *Рис. 4. Принципиальная схема передатчика с магнетроном* |

Для более коротких волн часто применяется емкостная связь самой лампы с колебательным контуром. В стеклянную колбу магнетрона помешается настроенная система Лехера, включенная на сегменты анода. Система Лехера выполняется из тонких пластинок (длиной 3/4 длины волны), идущих параллельно друг другу и коротко замкнутых на противоположном конце мостиком.

Такая конструкция дает возможность осуществить емкостную связь с внешним колебательным контуром и увеличивает площадь охлаждения анода. Внешний колебательный контур выполняется в виде дуги из проволоки с пластинками на концах. Пластинки накладываются на стеклянную колбу лампы, чем и достигается емкостная связь между внешним и внутренним контурами. Если длина дуги от сгиба до пластинки равна одной четверти длины волны λ ⁄4, тогда на сгибе получается узел напряжения и пучность угока. Возможно применение дуги контура с длиной, равной ¾λ; в этом случае на сгибе также получается узел напряжения и пучность тока, а на расстоянии λ ⁄2 от концов дуги получается пучность напряжения. В эти точки присоединяются полуволновые вибраторы антенны. Схема такого передатчика указана на рис. 5.

|  |
| --- |
| http://www.chipinfo.ru/literature/radio/194608_9/img/24.jpg |
| *Рис. 5. Схема передатчика с магнетроном, связанного с антенной через емкость: 1 стеклянная колба магнетрона, 2 полюса постоянного магнита, 3 пластинки системы Лехера, 4 анод магнетрона, 5 катод магнетрона, 6 пластинки дуги колебательного контура, 7 дуга колебательного контура, 8 вибратор, 9 аккумулятор накала, 10 анодный аккумулятор.* |

В зависимости от назначения схемы применяются различные колебательные контуры и типы магнетронов. В настоящее время применяются магнетроны, рассчитанные на волны длиной от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров при колебательной мощности от десятых долей ватта до тысячи киловатт. Говоря о мощности в сотни или тысячу киловатт, следует помнить при этом, что эта мощность мгновенная в импульсе, длящемся не более нескольких миллионных долей секунды. Магнетроны для больших мощностей требуют применения особых мер для отвода тепла с анода. В зависимости от мощности и конструктивного выполнения магнетронов применяется или водяное или воздушное охлаждение. Магнетроны небольшой мощности имеют воздушное охлаждение. Для увеличения площади охлаждения у некоторых типов магнетронов на сегментах анода устанавливаются ребра.

На режим работы магнетрона оказывает большое влияние режим питания, т, е. напряжения на аноде и нити накала и напряженность магнитного поля.

Как правило, при повышении анодного напряжения увеличивается и частота колебаний, следовательно, длина волны уменьшается.

Увеличение напряжения накала повышает ток эмиссии и влечет за собой уменьшение частоты колебаний. Таким образом повышение напряжения накала вызывает увеличение длины волны.

Регулировка напряженности магнитного поля дает такие же результаты, как изменение анодного напряжения, т. е. с возрастанием напряженности укорачивается длина волны. Влияние напряжений анода и накала, а также величины напряженности магнитного поля имеют очень большое значение для работы магнетрона, они должны постоянно приниматься во внимание.

Коэфициент полезного действия магнетрона значительно ниже, чем у обычного электронного генератора; в зависимости от характера колебаний и длины волны он может составлять от б до 35 процентов.

Чтобы предотвратить уход частоты в магнетронном генераторе от колебаний напряжения в питающей сети, магнетронные генераторы должны работать только со стабилизаторами напряжения сети. Стабильность напряжения должна быть достаточно высокой, чтобы изменение частоты передатчика не выходило за пределы допустимой ширины полосы настройки приемника. Так как обычно в передатчиках работают магнетроны с ностоянными магнитами, то стабилизировать нужно анодное и накальное напряжение. В качестве стабилизатора напряжения может быть применен любой из известных типов стабилизаторов, дающий постоянство напряжения, равное 0,5% от номинального, при изменении напряжения сети в пределах от 20% до + 10%.

В цепь анода магнетрона включается омическое сопротивление в 310 т ^ . Сопротивление предохраняет лампу от значительных бросков тока.

Значительное влияние анодного напряжения на частоту колебаний магнетрона позволяет очень легко и просто осуществить частотную телефонную модуляцию. Действительно, если к постоянному анодному напряжению приложить некоторое дополнительное напряжение звуковой частоты, то это вызовет изменение частоты, возбуждаемой магнетроном (рис. 6).

|  |
| --- |
| http://www.chipinfo.ru/literature/radio/194608_9/img/25.jpg |
| *Рис. 6. Частотная модуляция при магнетроне: 1 частотная характеристика при отсутствии модуля-2 частотная характеристика при модуляции звуковой частотой, fo номинальная частота, f1f2 девиация частоты при модуляции.* |

Таким образом, можно легко магнетрон модулировать по частоте и осуществить не только телефонную передачу, но даже высококачественную передачу музыки и телевидения. Крайняя простота получения частотной модуляции для телефонных передатчиков дециметровых и сантиметровых волн на магнетронах обусловила их исключительно широкое применение.

Рассмотрим теперь, как обнаружить возбуждение колебаний генератора с магнетроном и как определить частоту этих колебаний.

Обнаружить колебания можно несколькими способами, в зависимости от схемы передатчика. При включении миллиамперметра в анодную цепь магнетрона наличие колебаний легко определяется по показаниям прибора. При отсутствии миллиамперметра наличие колебаний можно определить по накаливанию нити лампочки от карманного фонаря. Для этого лампочку надо: расцоколевать и, водя ее выводными проводниками по колебательному контуру передатчика, наблюдать, накаливается ли нить лампы. При этом наибольший накал будет в местах, где имеется пучность напряжения.

Можно обнаружить наличие колебаний по накалу лампочки, связав ее через небольшой виток проволки с колебательным контуром. Однако следует помнить, что этими методами можно обнаружить колебания только в том случае, если в колебательном контуре имеется мощность не меньше 0,20,3 W. Колебания мощностью меньше 0,2 W можно обнаружить с помощью индикаторного контура (рис. 7).

|  |
| --- |
| http://www.chipinfo.ru/literature/radio/194608_9/img/26.jpg |
| *Рис. 7: Схема связи индикаторного контура с генератором: 1 колебательный контур генератора, 2 провод длиною 0,20,25, 3 кристалический детектор, 4 микроамперметр на 15-20 µA* |

Сближая индикаторный контур с колебательным контуром генератора, мы получаем при наличии колебаний отклонение стрелки измерительного прибора. Для указанного индикаторного контура нельзя применять обычные кристалические детекторы из-за их большой емкости. В этой схеме должен быть применен кремневыйдетектор с очень малой емкостью, пригодный для дециметровых и сантиметровых волн.

Определить длину волны можно с помощью системы Лехера. Система Лехера представляет собой пару параллельно натянутых неизолированных проводов, длина которых равна 23 длинам волны. Диаметр провода 1,52 mm при расстоянии между центрами проводов 610 mm. Один конец системы Лехера имеет виток, служащий для связи с колебательным контуром. Концы системы изолированы. Если связать систему Лехера с колебательным контуром, то в провоДах возникнут стоячие волны. В зависимости от длины проводов вдоль их образуются несколько стоячих волн тока и напряжения с пучностями и узлами, как это указано на рис. 8. Между отдельными узлами и пучностями тока или напряжения сохраняется вполне определенное расстояние, равное полуволне (λ ⁄2).Если в колебательном контуре передатчика мы имеем мощность не меньше 0.20,3 W, то с помощью расцоколеванной лампочки от карманного фонаря легко определить места, соответствующие пучностям напряжения. В пучности напряжения лампочка будет накаливаться наиболее сильна. Определив места на проводах системы, где лампочка накаливается сильнее, и измерив эти расстояния обычной сантиметровой линейкой, легко определить длину волны, так как расстояние между двумясмежными пучностями равно полуволне λ ⁄2

|  |
| --- |
| http://www.chipinfo.ru/literature/radio/194608_9/img/27.jpg |
| *Рис. 7: Схема связи индикаторного контура с генератором: 1 колебательный контур генератора, 2 провод длиною 0,20,25, 3 кристалический детектор, 4 микроамперметр на 15-20 µA* |

При мощности в колебательном контуре меньше 0,20,3 W определение длины волны по системе Лехера с помощью лампочки накаливания невозможно. В этом случае следует воспользоваться индикаторным контуром (рис. 7), система Лехера при этом размыкается. К выходным концам детектора подсоединяется микроамперметр. Детектор передвигают вдоль проводов, как и лампочку накаливания. В пучностях напряжений будут получаться наибольшие отклонения стрелки микроамперметра. Измерив расстояния на проводах системы Лехера между точками, соответствующими наибольшим отклонениям микроамперметра, мы легко определим длину полуволны.

[Вернуться к содержанию журнала "Радио" 8-9 номер 1946 год](http://www.chipinfo.ru/literature/radio/194608_9/)

**Магнетрон**

На сцене появилось новое устройство, магнетрон, которое стало в середине 1920-х гг. преимущественным генератором. Было показано, что с помощью магнетрона можно получать очень высокие частоты.

В магнетроне используется комбинация электрического и магнитного полей. В первой реализации прямая нить накала (катод) окружалась цилиндрическим анодом. Внешнее магнитное поле было направлено так, чтобы заставить электроны, летящие к аноду, двигаться по спирали между двумя электродами.

Это устройство было изобретено Альбертом В. Халлом (1880—1966), который родился на ферме в штате Коннектикут и после получения степени в Йельском университете в 1913 г. стал работать в исследовательской лаборатории Дженерал Электрик (GE). В 1914 г. он изобрел «динатрон», первый в длинном ряду радиоламп впервые созданных им. Он также проводил исследования по проблемам кристаллографии и использовал рентгеновские лучи.

В течение 1916 г. Халл начал эксперименты по контролю потока электронов в лампах с помощью магнитного поля как альтернативный способ вместо сетки, который использовался в то время. Контроль с помощью сетки в то время был объектом спора между Дженерал Электрик и Американской Телефонной и Телеграфной Компании, касающимся оплаты автору изобретения Ли де Форесту.

В 1920-х гг. Халл и его сотрудники в Дженерал Электрик продемонстрировали, что устройство, первоначально имевшее несколько названий, но, в конце концов, стало называться магнетроном, может быть использовано на низких частотах в качестве усилителя или генератора в радиосистемах, а также в качестве электронного ключа в преобразователях мощности. Летом 1921 г. права на изготовление ламп, по-видимому, сделали магнетрон не очень важным для радиотехники. В Дженерал Электрик продолжались работы с магнетроном, но для высоких мощностей. В 1925 г. Халл изготовил магнетрон высокой мощности для получения волн с длиной 15 км и мощностью 15 кВт.

Важное открытие, что магнетрон может генерировать колебания с очень высокой частотой, было независимо сделано в Германии и в Японии в середине 1920-х гг., но оно оставалось неизвестным в Америке вплоть до 1928 г. Чешский физик Август Цачек опубликовал в 1924 г. на чешском языке результаты экспериментов, в которых он сумел генерировать волны длиной 29 см. Однако эти результаты получили распространение только, когда его работа была описана в немецком специализированном журнале в 1928 г. В 1924 г. аналогичные результаты были получены Эриком Хабаном в университете г. Йена.

В Японии электрофизик Хидетсугу Яги (1886— 1976) и его студент Кинийро Окабе (1896—1984) внесли важный вклад в разработку магнетрона высоких частот. Яги родился в Осаке и получил степень по техническим наукам в Токийском университете в 1909 г. Перед Первой мировой войной он учился в Англии вместе с Джоном Флемингом, изобретатель лампового диода для детектирования радиоволн. Яги заинтересовался возможностью связи на коротких волнах, когда провел некоторое время в Дрездене (Германия) с Генрихом Георгом Баркгаузеном (1881 — 1856), изобретатель особой ламповой схемы для генерации высоких частот. С началом войны Яги возвратился в Японию для преподавания в Тохоку Имперском университете, где он в 1919 г. получил докторскую степень. В начале 1920-х гг. он узнал о магнетроне Халла от японского морского офицера, который возвратился после посещения США.

*Окабе, который стал первоклассным специалистом по магнетронам, окончил университет Тохоку в 1922 г., а в 1928 г. защитил под руководством Яги диссертацию. В 1927 г. Окабе сообщил, что ему удалось получить генерацию с длиной волны около 60 см, используя магнетрон. Он исследовал множество электродов разной геометрии, и обнаружил, что если разрезать цилиндрический анод на два полуцилиндра (конфигурация известная как «разрезной анод»), то можно получить большую мощность. В 1928 г. Яги посетил США, чтобы обсудить эксперименты Окабе, который к тому времени уже генерировал волны в 12 см. Яги также описал разработанную им направленную антенну сверхвысоких частот, которая состояла из активного элемента и нескольких отражающих и пассивных элементов. Эта антенна нашла широчайшее применение в телевизионной технике.*

После того как в 1931 г. англо-французская группа установила связь через Ла-Манш, используя волны 18 см, во всем мире возник огромный интерес к коммуникациям на микроволнах (релейные радиолинии). Один журнал опубликовал редакционную статью, в которой утверждалось, что эта система открыла нетронутую землю, что обеспечивает диапазон частот для тысяч радиоканалов. Редактор писал, что эксперимент через Ла-Манш означает «новую эпоху в области электрических коммуникаций», он настолько революционен, что требует нового имени. Он отмечал также, что аппаратура настолько компактна, что подобные системы можно устанавливать на кораблях и самолетах.

Также хорошо известный специалистам американский периодический журнал Electronics объявил, что потрясающая линия между Дувром и Кале показала, что ультракороткие волны, рассматриваемые как мало полезные, вдруг приобрели огромную важность.

Магнетрон начал свое триумфальное шествие: число научных публикаций об этом устройстве стремительно росло до 1933 г. и оставалось на высоком уровне вплоть до 1940 г., когда в связи с разразившейся войной публикации прекратились по соображениям секретности. Важные исследования, приведшие к существенным улучшениям, были сделаны в 1930-х гг. во Франции, Англии и Германии.

Клистрон

В 1930-х гг. магнетрон был единственным хорошим генератором, пригодным для работы на очень высоких частотах. Ч.Э. Клитон (г. р. 1907) и Н.Г. Вильяме (1870—1956) из Мичиганского университета, выполнили первые спектроскопические измерения на микроволновых частотах. Они использовали магнетрон для исследования спектра поглощения аммиака. В исследованиях с целью определить практический предел длин волн, которые можно генерировать с помощью магнетрона, было показано в 1936 г., что можно получить колебания с длиной волны 6,4 мм. Однако эффективность магнетрона была не очень высокой. Поэтому новое устройство, названное «клистрон», было разработано в Стэнфорде, в Калифорнии Расселом Варианом (1898-1959), Сигердом Варианом (1901 —1961) и др.

Клистрон работает на совершенно другом принципе по сравнению с системами, использовавшимися до него для генерации высоких частот. В нем электроны сбиваются в сгустки, которые снабжают энергией объемный резонатор.

Объемный резонатор состоит из полости проводящего материала, в которой образуются стоячие электромагнитные волны. Чтобы эта полость стала резонатором, нужно, чтобы ее размеры соответствовали длине волны. Для полостей простой формы, например куб, это соотношение гласит (как мы уже видели), что сторона полости должна быть кратной целому числу полуволн. Уменьшение длины волны сказывалось на микроволновой технике. Было установлено, что для передачи микроволн с одного места в цепи до другого нужно направлять их в подходящие металлические структуры. Волноводы, как их стали называть, представляют металлические трубы круглого или прямоугольного сечения, и волна распространяется в них за счет отражений от стенок. Эти волноводы могут быть и антеннами, если они имеют открытый конец.

Радар

Микроволновые устройства и технологии получили мощный импульс развития между 1930 и 1945 гг. из-за необходимости получения ультракоротких волн, нужных для разработок и создания радаров (аббревиатура, введенная американцами: radio detection and ranging).

Принцип работы радара очень прост: импульс радиоволн посылается на цель, частично отражается обратно к приемнику, где и регистрируется. Посылаемый и отраженный импульсы визуализируются на осциллоскопе, и, измеряя временной интервал между моментами, когда импульс был послан и когда пришел обратно, можно определить расстояние до цели.

Еще Герц и другие наблюдали, что радиоволны могут отражаться металлическими предметами. В 1904 г. немецкий инженер Хулсмейер получил патент на использование этого свойства для обнаружения препятствий при плавании кораблей. Он построил устройство, с которым получил хорошие результаты в Роттердамском порту. Но никто не заинтересовался разработкой этой системы, которая была слишком передовой для того времени.

Результаты первых экспериментов по ионосферному радиозондированию атмосферы, которые провел Эплтон (1925 г.) с целью доказать существование ионизованных слоев в атмосфере, способных отражать микроволны, оживил идею использовать методы, основанные на отражении радиоволн, для локализации объектов, расположенных на больших расстояниях. Принцип использования импульсов излучения, что является характерной особенностью современного радара, впервые был реализован в 1925 г. Д. Брейтом (1899—1981) и М.А. Тьювом (1901-1982) из Вашингтонского Института Карнеги для измерения высоты ионосферы. Итак, ряд экспериментов по применению принципа локализации земных объектов и определения расстояний до них начался в Европе и США. При проведении исследований, связанных с использованием микроволн для связи, было найдено, что можно обнаружить присутствие судов и самолетов путем регистрации энергии, которую они отражают.

В США, в Исследовательской лаборатории Военно-морского флота (NRL), уже с 1920-х гг. была известна возможность обнаружения движущихся объектов путем отражения электромагнитных волн. В. Делмар Гершбергер и его сотрудники использовали для этой цели магнетроны, изготовленные фирмами «Вестингауз» и RCA, для проведения экспериментов на сантиметровых волнах. Были получены успешные результаты. Однако в то время было мало квалифицированных специалистов, чтобы довести устройства до практического использования.

Разработки радаров в Великобритании

В Великобритании, в 1934 г., желание защитить страну от воздушного нападения привело Г. Э. Вимперса, директора исследований при Министерстве авиации к обращению за советом к А. В. Хиллу (1886—1977), видному физиологу из Кембриджа, который получил в 1922 г. Нобелевскую премию по физиологии, и который был офицером артиллерии в Первой мировой войне. Конкретно, задавался вопрос о возможности уничтожения вражеских самолетов. Результатом обсуждений было обращение Вимперса 12 ноября 1934 г. к Государственному секретарю по военно-воздушным силам с просьбой организовать комитет для рассмотрения того, насколько последние успехи в науке и технике могут быть использованы для усиления противовоздушной обороны» Вимперс предложил, чтобы председателем этого комитета был профессор Г. Т. Тизард (1885—1959), декан химического факультета Империал Колледжа. А членами предлагалось назначить Хилла и профессора П. М. С, Блэккета (1897—1974), который характеризовался «как морской офицер в войне (1914-18), который с тех пор проявил себя своей работой в Кембридже, как один из лучших молодых научных лидеров». Эта характеристика была вполне оправдана, так как в 1948 г. Блэккет получил Нобелевскую премию по физике «за развитие метода камеры Вильсона и открытие с ее помощью в области ядерной физики и космических лучей». Комитет был немедленно создан и 28 января 1935 г. состоялось первое заседание. Вимперс обратился с запросом к Суперинтенданту радиоисследовательского отдела Национальной Физической лаборатории Роберту Ватсон-Ватту (1892—1973), нельзя ли выводить из строя вражеские самолеты или их экипажи с помощью интенсивных пучков радиоволн. Ватсон-Ватт немедленно ответил, что произвести такие «лучи смерти» нереально, но вместо этого возможно обнаруживать вражеские самолеты. Он представил расчеты, показывающие, что энергию, отражаемую самолетом, облучаемого мощным пучком радиоволн, можно использовать для этой цели. Немедленно была проведена работа по демонстрации, которая дала прекрасные результаты 26 февраля 1935 г. Она была настолько успешной, что было начато сооружение системы радиолокационных станций. Было продемонстрировано обнаружение корабля на расстояние около 30 км и возможность обнаружения самолета на расстояние 160 км. Роберт Ватсон-Ватт написал фундаментальное уравнение радара, которое показывает, что максимальное расстояние, на котором можно обнаружить самолет, пропорционально линейным размерам антенны и только лишь корню четвертой степени из мощности. Это означает, что для увеличения дальнодействия радара в 2 раза нужно увеличивать мощность в 16 раз.

Расстояние также увеличивается при уменьшении длины волны, но это не представляло интереса для Ватсона-Ватта. В то время не было генераторов высокой мощности, работающих на длине волны меньшей чем 10 м. Поэтому была выбрана длина волны 50 м, руководствуясь тем соображением, что радиоволны будут хорошо отражаться от бомбардировщика, когда размах его крыльев будет приблизительно равен половине длины волны. Но вскоре было установлено, что радиолокационные станции создают взаимные интерференционные помехи, и длина волны была уменьшена до 26 м, а затем и до 13 м.

К сентябрю 1938 г. побережье в районе устья Темзы было покрыто сетью радаров, и радары были также установлены на главных британских линкорах. Благодаря этому Великобритания смогла противостоять врагу и получить преимущества в битве с немецкими военно-воздушными силами во Второй мировой войне (август 1940 г.), а установка радаров на кораблях позволила британскому флоту добиться впечатляющих успехов (сражение у мыса Матапан, март 1941 г.).

В марте 1935 г. корабли британского флота могли обнаруживать самолеты лишь с помощью биноклей с увеличением 7х. А вскоре после Мюнхенского кризиса (1938 г.) они могли обнаружить самолет на расстоянии до 100 км благодаря радару.

Разработки радаров для флота продолжались в течение всей войны, иногда сопровождаясь некоторыми странностями. Один эпизод может показать нам, как в то время плохо понималось использование радиоволн, а некоторые эффекты казались таинственными. В 1943 г. немцы стали атаковать английские военные корабли летающими бомбами, управляемыми по радио. Это вызывало страх среди команды. Однажды флотские специалисты, случайно, во время одной из таких атак в Бискайском заливе включили электрические бритвы и к своему, а также и всей команды, изумлению, увидели, что бомба стала поворачиваться в небе, а затем направилась в сторону самолета, который запустил ее. Немедленно Адмиралтейство разослало приказ включать все имеющиеся на корабле электрические бритвы и размахивать ими против летающих снарядов. Эффективность этой меры не зарегистрирована в официальных бумагах, но она, определенно, повышала моральный дух команды.

После разработки цепи радаров, защищающих Темзу, Ватсон-Ватт и его сотрудники обратили свое внимание на радар для установки его на самолете. Радары второго поколения с длиной волны 1,5 м имели размеры, позволяющие установить их на самолетах, предназначенных для обнаружения подводных лодок, всплывающих ночью. Каждый согласится, что длина волны 10 см еще лучше, и поэтому старались освоить этот диапазон длин волн. Одна из причин улучшения — резкое уменьшение размеров аппаратуры и повышение эффективности определения целей. 12 августа 1940 г. впервые был испытан радар для самолета, работающий на длине волны 10 см.

Резонаторный магнетрон

В первые месяцы войны был сформирован Британский комитет по координации разработок радиоламп. Он заключил ряд научно-исследовательских и промышленных контрактов на разработку радиоламп для передатчиков и приемников с длиной волны 10 см. Один из контрактов был заключен с группой профессора М. Олифанта (1901—2000) из Бирмингемского университета, который в 1937 г. перешел из Кавендишской лаборатории для организации в Бирмингеме лаборатории ядерной физики. Эта группа первоначально интересовалась разработкой генератора на основе клистрона, с которым Олифант ознакомился во время своей поездке в США в 1938 г. В результате, к концу 1939 г., его группа создала клистрон, который генерировал около 400 Вт непрерывной мощности на длине волны 10 см, а несколькими месяцами позже был создан и импульсный вариант, пригодный для радара.

Однако это устройство оказалось слишком громоздким для установки на самолет, и хотя клистроны меньшего размера использовались в самолетных радарах, продолжались поиски альтернативного варианта. В группе также работали и другие специалисты, включая Дж. Рэндала (1905—1984). Он получил докторскую степень в Манчестерском университете, выполняя исследования по рассеянию рентгеновских лучей, и провел год в лаборатории Британской Компании Дженерал Электрик, где приобрел опыт в области устройств высокого вакуума. Г. Бут (1917—1983) получил высшее образование в области физики в 1938 г. и в 1941 г. стал доктором в Бирмингеме. Олифант попросил их исследовать схемы, которые требовались для мощного генератора. Поэтому в 1940 г. они начали исследование с целью улучшить магнетрон, на основе идеи использовать цилиндрический резонатор, выполняющий двойную функцию: определять частоту и служить анодом магнетрона. Они испробовали новое устройство, которое было названо «резонаторным магнетроном», 21 февраля 1940 г. и получили около 400 Вт на 9,8 см.

Немедленно это устройство было внедрено Компанией Дженерал Электрик в улучшенной модификации с увеличенной до 10 кВт мощностью. И в мае уже работал радар, использующий этот новый магнетрон. Он способен был обнаружить перископ подводной лодки на расстоянии 10 км.

Осенью 1940 г. британская научная и техническая миссия, возглавляемая сэром Генри Тизардом, привезла этот резонаторный магнетрон в США.

После триумфа по обороне Темзы ожидалось, что Тизард будет назначен Главным Научным Военным Консультантом. Так и было некоторое время, но когда Уинстон Черчилль стал премьер-министром, он выбрал на эту должность другого специалиста. Тизард стал менее влиятельным, но был назначен главой деликатной миссии в США. Эта миссия должна была убедить США, в то время нейтральных, разрабатывать и производить технику, нужную для войны. Англичане сначала не решались разглашать перед американцами устройство магнетрона, опасаясь, что это попадет в руки немецкой разведки, но последующее полностью оправдало усилия миссии Тизарда. Впервые резонаторный магнетрон был 6 октября 1940 г. продемонстрирован американцам в Bell Telephone Laboratories, Раскрытие этого устройства привело к созданию Лаборатории излучений в Массачусетском технологическом институте, знаменитом MIT в Бостоне. Была сколочена элитная группа ученых и инженеров, набранных из университетов и промышленности. В результате, в годы войны было создано множество магнетронов и более 100 радарных систем, которые обеспечили союзникам техническое преимущество. Более двух миллиардов долларов было вложено в эти разработки в течение войны, и это дало импульс развития микроволновой технологии и в послевоенный период.

По предложению Тизарда многие из приглашенных специалистов были ядерными физиками, потому что, как сказали британские визитеры на основе своего опыта, они более легко адаптируются в новые исследования, чем радиоинженеры. Ли Ду Бридж (1904—1996) из Рочестерского университета был назначен главой новой лаборатории. Среди других в ней были И. Раби, Кен Бэйнбридж (1904—1996), Норман Рамси, Эд Парсел, Эрни Полард и Луис Альварец, многие из которых еще сыграют роль в нашей истории.

Радар в других странах

Во время войны радар также разрабатывался в Германии для противовоздушной обороны и в Италии для целей навигации. Немцы уже начали исследования по магнетронам и микроволновым системам в 1930-х гг. Фирма Телефункен в Берлине экспериментировала с системой овладения «таинственными лучами» для обнаружения самолетов, которая была в 1935 г. описана в статье американского журнала Electronics. Эта фирма разработала Wirzburg, систему противовоздушного радара, используемого Люфтваффе в течение всей войны.

Однако оказалось, что предложение оборудовать истребители радаром встречает сопротивление Геринга, который утверждал, что немецкие пилоты настолько умелые, что им не нужны «кинематографические инструменты».

Первый работающий радар был построен в 1935 г. и был продемонстрирован Гитлеру, Герингу и сопровождающим их лицам. Соперничество между немецкими министерствами, недостаточное привлечение университетов и стремление к секретности были причиной неполного использования радара в Германии.

В Италии в 1924 г, профессор Н. Каррара (1900—1993) был назначен заведующим кафедрой физики в Военно-морской академии. Здесь проводились исследования по генерации и приему сантиметровых волн. Вначале 1930-х гг. разные авторы писали о возможности использовать микроволны, чтобы получать эхо от неподвижных или движущихся объектов, и в 1933 г. Маркони выполнил успешный эксперимент, используя моторный экипаж, движущийся рядом с микроволновым пучком. Новость была подхвачена СМИ, которые заговорили о «лучах смерти», с помощью которых Маркони выключал двигатели автомобилей и самолетов.

В 1935 г. профессор Тиберио (1904—1980), офицер флота, представил комиссии Министерства лекцию, в которой продемонстрировал возможность использовать микроволн для ночного обнаружения (так тогда писали), и на следующий год Флот начал секретные исследования. Тиберио проводил эти исследования с целью разработки радиодальномера. С 1936 по 1941 г. несколько прототипов было реализовано, а в 1942 г. были созданы 50 систем для Флота и для обнаружения самолетов. Одной из этих систем было обнаружено соединение американских самолетов, которые в мае 1943 г. провели сильную бомбардировку Ливорно. На стадии изготовления аппаратуры возникли значительные трудности, поскольку нельзя было получать нужные материалы из США, а Германия требовала невыполнимых условий. Были попытки организовать нужное производство в Италии, но они оказались неудачными. Хорошо известным результатом было сражение у мыса Матапан, в котором итальянские корабли были лишены радаров.

В Японии, несмотря на интенсивные исследования в области магнетронов и микроволн, разработка радаров тормозилась из-за разногласий между Армией и Флотом и отсутствием централизованных усилий, подобных тем, что были в США.

В Советском Союзе были активные исследования в области магнетронов, но, по-видимому, решающий шаг в сторону использования импульсов, а не непрерывного режима, не был сделан.

В течение войны лучшие английские и американские ученые были вовлечены в исследования по микроволнам и радарам, и в конце войны микроволновые системы легко перешли в исследовательские институты с целью продолжения фундаментальных исследований в этой области. Поэтому в конце войны эти исследования естественным образом оказались связанными с микроволнами.

Взаимодействие микроволн с веществом может привести к переходам между энергетическими уровнями молекул, лежащими близко друг от друга. Малая энергия соответствует энергии микроволновых фотонов. Также микроволны могут взаимодействовать с магнитным моментом электрона (спин) или атомных ядер. В этих случаях магнитное поле волн воздействует на магнитный момент частицы (электрона или ядра) и ориентируют его путем соответствующего изменения энергии. Эти явления взаимодействий между микроволнами и веществом составляют предмет радиоспектроскопии. Радиоспектроскопия естественным образом возникла из разработок радаров и генераторов микроволн во время Второй мировой войны. После войны эти генераторы стали использовать в спектроскопических исследованиях, которые позволяли выявить малые детали молекулярных структур и атомных ядер. Единственным измерением, выполненным до войны с помощью микроволн, было измерение частоты инвертированного перехода в молекуле аммиака, лежащей в сантиметровом диапазоне. Как мы уже говорили, это измерение было выполнено Клитоном и Вильямсом в 1934 г.

Из-за научного интереса эти работы быстро перешли из промышленных лабораторий, где проводились исследования, в университеты, где добывалась информация, относящаяся к фундаментальным проблемам физики и химии. Для этих исследований частотная чистота или когерентность излучения была очень важным свойством. Было необходимым иметь источники, которые испускают одиночную частоту, или, если это невозможно, то, по крайней мере, иметь частоты в очень ограниченном диапазоне, которые не подвержены сильным флуктуациям.

Для лучшего понимания взаимодействий микроволн с веществом нам следует обратиться к дальнейшему развитию спектроскопии