

Юрий Черников



10 августа 1940 г. сотни бомбардировщиков Люфтваффе перелетели пролив Ла-Манш и обрушили на английские города, аэродромы и военные базы тысячи бомб. Воздушная битва за Британию началась. Англичане мужественно сопротивлялись нашествию немецкой воздушной армады в течение девяти месяцев, обе стороны несли тяжелые потери. Зимой из-за неблагоприятной погоды интенсивность налетов снизилась, и 16 мая 1941 г. основные силы Люфтваффе были отправлены на восток для подготовки к вторжению в СССР. Воздушная битва за Британию была англичанами выиграна.

Важнейшую роль в этой битве сыграло использование силами ПВО и ВВС Британии радаров для обнаружения самолетов противника.

9 июня 1904 г. в гавани Роттердама немецкий изобретатель Кристиан Хюльсмайер продемонстрировал успешную работу своего телемобилоскопа (прототипа радара), который сообщал наблюдателю с помощью электромагнитных волн об удаленных металлических предметах (кораблях). Сначала это изобретение не получило дальнейшего развития, однако в 20-х и 30-х гг. прошлого столетия в связи с возникшей высокой необходимостью, в первую очередь военной, обнаруживать и определять местоположение удаленных движущихся объектов (кораблей и самолетов) усилия ученых и инженеров в разных странах были направлены на создание радара. Именно об этом пойдет речь в данной статье.

НАЧАЛО РАДИОЛОКАЦИИ

К концу Первой мировой войны количество радиостанций длинных и средних волн достигло

такого числа, при котором произошло плотное заполнение этого участка электромагнитного спектра, и связь осуществлялась в условиях сильных взаимных помех от близких по частоте радиостанций. Для размещения новых радиопередатчиков необходимо было осваивать другие, более коротковолновые диапазоны радиоспектра. Проведенные расчеты показали, что в спектре коротких волн, т. е. от 10 до 200 м, можно разместить значительно большее количество передатчиков, чем на более длинных волнах. Поэтому вполне естественны были попытки использовать для связи волны короче 200 м. Но многочисленные опыты не привели к успеху. Связь на коротких волнах получалась на значительно меньших расстояниях, чем на длинных и средних волнах, была неустойчивой и ненадежной. Решением Международного консультативного комитета по радио (МККР) волны длиной от 50 до 200 м были признаны непригодными для профессиональной связи и отданы

радиолюбителям, им было разрешено собирать не только радиоприемники, но и передающую аппаратуру.

Имея передатчики сравнительно малой мощности, порядка единиц и десятков ватт, радиолюбители довольно быстро обнаружили, что на близких расстояниях радиосвязь была очень неустойчивой, и прохождение сигнала прекращалось довольно быстро при увеличении дистанции. В то же время хорошая связь получалась как раз на очень больших расстояниях. В конце 1921 г. на западном побережье Шотландии были приняты коротковолновые сигналы американских радиолюбителей, а в 1922 г. установлена двухсторонняя коротковолновая радиолюбительская связь меж-



Кристиан Хюльсмайер

ду Францией и Америкой. Мощность передатчиков не превышала 30 Вт. Следует подчеркнуть, что для осуществления таких связей на длинных и средних волнах необходимы были мощности в сотни кВт.

Довольно быстро специалисты проявили к этому явлению значительный интерес и осознали, что такие дальние связи можно объяснить только влиянием верхних проводящих слоев атмосферы — ионосферы. В начале 20-х гг. прошлого столетия стали складываться представления о том, что характер распространения волн вдоль поверхности земли и в пространстве различен. На коротких волнах потери в земле велики, и поверхностная волна быстро поглощается, в то время как пространственная волна отражается атмосферой (иногда многократно) (рис. 1) и может быть принята, но только на достаточном расстоянии от передатчика. Предположение о наличии ионизированного слоя, способного отражать радиоволны, было высказано еще в 1902 г. английским физиком Оливером Хэвисайдом и независимо от него американским инженером-электриком Артуром Кенелли, который проводил эксперименты по дальнему приему коротких волн через Атлантику между Европой и Америкой. Значительный вклад в создание теории распространения коротких волн в эти годы внесли советский ученый в области радиотехники, профессор МВТУ Михаил Васильевич Шулейкин (1922 г.) и английский физик-теоретик и математик, профессор математики Кембриджского университета Джозеф Лармор (1924–1925 гг.).

В сентябре 1922 г. два экспериментатора Хойт Тейлор и Лео Янг, служившие в Авиационной радиолaborатории ВМФ США, проводили опыты по связи на декаметровых волнах (частота волны от 3 до 30 МГц) через реку Потомак. В это время по реке прошел корабль, и связь прервалась. Тейлор и Янг отметили этот факт.

Исторической справедливости ради следует сказать, что впервые явление прерывания радиотелеграфной связи между двумя кораблями при прохождении между ними третьего судна наблюдал А. С. Попов в 1897 г. на Балтике.

Тейлор и Янг предложили устанавливать на эсминцах передатчики и приемники декаметрового диапазона, чтобы можно было обнаружить в темноте или в тумане прохождение любого судна между эсминцами, установившими между собой радиоконтакт. Свой доклад об этом Тейлор и Янг послали в морское министерство США, но поддержки их предложение не получило.

11 декабря 1924 г. профессор физики Лондонского университета Эдвард Эпплтон и его аспирант Майлс Барнет получили первое экспериментальное подтверждение существования ионосферы. В процессе этого эксперимента, выполненного с помощью компании «Бритиш бродкастинг», изучалась незатухающая серия волн при медленном непрерывном изменении длины волны. В приемнике происходила интерференция непосредственно приходящих волн (земная волна) с отраженными от ионосферы. Определялись максимумы и минимумы интерференции. Отсюда при извест-

ном изменении длины волны определялась длина пути луча и кажущаяся высота слоя Хэвисайда — Кенелли, т. е. та высота, на которой происходило отражение. Это был существенный шаг в направлении создания радиолокации.

Другой, импульсный метод измерения кажущейся высоты ионосферы был предложен и испытан в 1925 г. двумя молодыми американскими физиками — Грегори Брейтом из Технологического института Карнеги (Вашингтон, округ Колумбия) и Мерлем Тьювом из Университета Джона Хопкинса в Балтиморе (штат Мериленд). В этом методе измерения используются короткие сигналы, продолжительность которых мала относительно различия во времени прохождения земной и отраженной волн. Сигнал сначала в момент t_0 достигает приемника, при наличии отражения в приемник несколько позже в момент t_1 попадает еще один сигнал. Эти импульсы регистрируются при помощи катодного осциллографа. По величине промежутка $t_1 \dots t_0$ определяется кажущаяся высота ионосферы.

Любопытно отметить, что Грегори Брейт родился в 1899 г. в Николаеве (Украина), там же учился и звали его до 1915 г., когда он эмигрировал в США, Григорий Альфредович Брейт-Шнайдер. Впоследствии, в 1939 г., он стал членом Национальной академии наук США. Тьюв также внес значительный вклад в развитие науки, был награжден медалью «За заслуги» президента США и стал командором Ордена Британской империи.

В июне 1930 г. Лоренс Хайленд, коллега Тейлора и Янга, проводил эксперименты по определению направления с помощью декаметровых волн. Он обнаружил, что когда над передающей антенной пролетает самолет, поле радиосигнала сильно искажается. Хайленд предложил использовать декаметровые волны для предупреждения о приближении вражеских самолетов.

В январе 1931 г. Авиационная радиолaborатория ВМФ США в Вашингтоне приступила к выполнению проекта, имевшего целью «обнаружение вражеских судов и самолетов с помощью радио», используя при этом метод «биений». В соответствии с этим методом передатчик и приемник разносились на большое расстояние и хорошо экранировались друг от друга. Передача велась в непрерывном режиме, и на приемнике в моменты, когда пролетающий самолет нарушал поле радиосигнала, наблюдались флуктуирующие сигналы, получившие название «биений». Дальность обнаружения достигала 65 км. Разнесение передатчика и приемника на большое расстояние для правильной

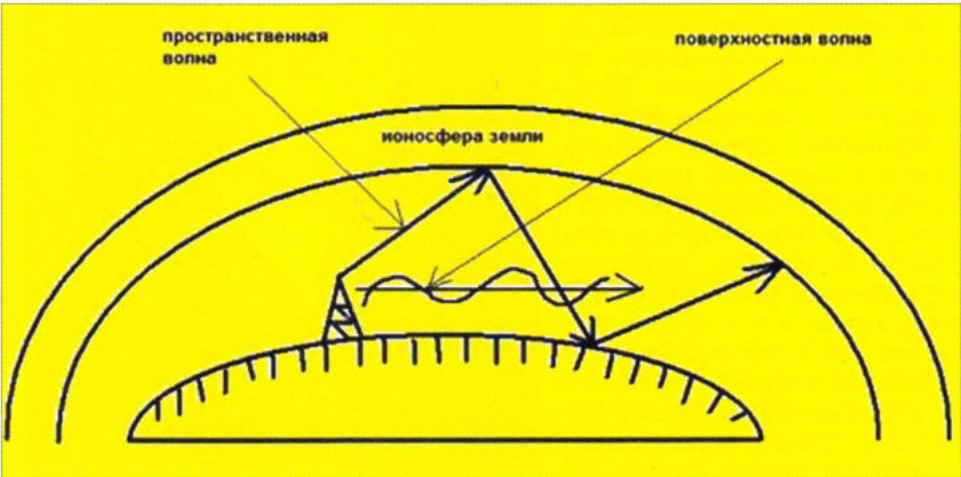


Рис. 1. Отражение радиоволн от слоя Хэвисайда – Кенелли

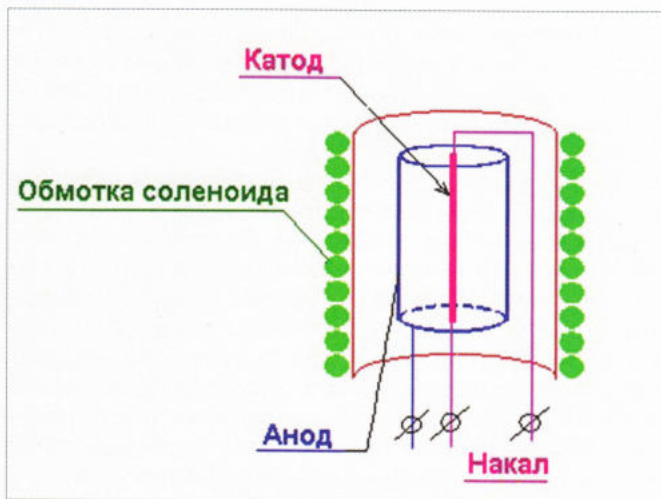


Рис. 2. Магнетрон К. Гединга

реализации метода «биений» исключало возможность его использования на кораблях ВМФ. Его полезность ограничивалась защитой больших наземных объектов, таких как города и военные базы. Поэтому ВМФ в январе 1932 г. передал армии результаты своих работ в этом направлении.

ИЗОБРЕТЕНИЕ МАГНЕТРОНА

Важным фактором, способствующим развитию радиолокации, явилось изобретение в 1910 г. К. Гедингом (Германия) управляемого магнитным полем вакуумного диода, на основе которого впоследствии были созданы генераторы коротких и ультракоротких волн. Этот диод (рис. 2) имеет всего два электрода: анод в виде пустотелого цилиндра и катод, совпадающий с осью анода. Баллон диода находится между полюсами сильного магнита и расположен так, что силовые линии магнитного поля пронизывают пространство внутри баллона вдоль оси диода. На поток электронов в этом диоде одновременно действуют во взаимно перпендикулярных направлениях статические электрическое и магнитное поля. Диод Гединга представлял собой альтернативу управляемой напряжением трехэлектродной вакуумной лампе американца Ли де Фореста, которую тот изобрел в 1906 г. Гединг назвал свой диод «магнетроном» (от магнит и электрон), однако это наименование в его авторстве не получило известности.

По общепринятой версии, автором термина «магнетрон» является Альберт Уоллес Халл, сотрудник исследовательской лаборатории фирмы General Electric в Скенектади (штат Нью-Йорк), опубликовавший в 1921 г. результаты своего исследования работы магнетрона, опробовав его в качестве усилителя в радиоприемниках и в качестве генератора низкой частоты. В первом случае усиливаемый ток подается в управляющую катушку магнетрона. Схема магнетронного генератора Халла (второй случай) приведена на рис. 3. Когда

электроны покидают катод, они попадают в сферу действия электрического поля анода и поля магнита. Сила электрического поля влечет электроны к аноду, и они устремляются туда по самым коротким путям — по радиусам. Сильное магнитное поле заставляет электроны лететь по кривым линиям. При определенных условиях электроны попадать на анод не будут; не долетая до него, они станут поворачивать обратно к катоду, и анодный ток прекратится. Анодное напряжение и напряженность магнитного поля подбирают таким образом, чтобы электроны немного не долетали до анода.

Электроны летят к аноду непрерывным потоком. На место тех, которые поворачивают обратно к катоду, тут же приходят новые. В результате рядом с анодом возникает электронное облачко, все электроны которого, подчиняясь действию магнитного поля, движутся в одну и ту же сторону и образуют непрерывный кольцевой поток. Это своеобразный катод, из которого можно черпать электроны. Его нетрудно «подтянуть» вплотную к аноду, регулируя анодное напряжение.

Халл подключил к магнетрону колебательный контур LC, в результате чего получилась схема генератора, создающего незатухающие колебания. При этом для управления магнитным полем магнетрона в целях генерации провод, образующий индуктивность L, этого колебательного контура LC, намотан в несколько витков вокруг корпуса магнетрона.

Благодаря тому, что круговой поток электронов почти касается поверхности анода, малейший электрический «толчок» в схеме нарушает равновесие и вызывает пульсации электронного потока. Электроны начинают попадать на анод. В анодной цепи создаются импульсы тока, которые возбуждают колебания в контуре. Созданный Халлом магнетронный генератор колебаний работал на частоте 20 КГц. Следует сказать, что в 1921 г. магнетрон не рассматривался как генератор СВЧ-колебаний.

ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА МАГНЕТРОНЕ

В 1924 г. Август Жашек, профессор Карловского университета в Праге (Чехословакия), обнаружил возможность генерирования колебаний высокой частоты (в дециметровом диапазоне волн) при включении колебательного контура между катодом и анодом магнетрона и при магнитном поле вблизи его критического значения. В качестве колебательного контура использовался отрезок двухпроводной линии. Схема этого генератора показана на рис. 4, где 1 — магнетрон со сплошным анодом, 2 — двухпроводная линия (магнит магнетрона на рисунке не показан).

В магнетроне при H , примерно равной $H_{кр}$, электроны совершают колебания в радиальных направлениях между катодом и анодом, и точка поворота электронов лежит возле анода. Данным колебательным движением электронов и возбуждаются колебания в контуре. При этом в



Альберт Уоллес Халл

пространстве, где постоянное магнитное поле перпендикулярно постоянному электрическому полю, происходит также взаимодействие электронов с радиальным электрическим полем высокой частоты, развиваемым в колебательном контуре. Неправильнофазные электроны, выходящие из катода во время существования на аноде положительной полуволны напряжения, получают дополнительное ускорение и сразу попадают на анод. Правильнофазные электроны, оставляющие катод во время отрицательной полуволны, тормозятся высокочастотным полем. Они не достигают анода и могут совершить несколько оборотов, оставаясь все время в правильной фазе. Опыт показал, что в магнетроне со сплошным анодом наиболее благоприятным для возбуждения колебаний в контуре является равенство между периодом собственных колебаний в этом контуре и временем пролета электрона от катода к аноду и обратно.

На такой генератор Жашеку был выдан патент Чехословакии № 20293 «Схема для генерирования электрических волн» (заявлен: 31.05.1924 г., опубликован: 15.02.1926 г.)

Следующим шагом в развитии магнетрона явилось использование в нем анода, разделенного щелями, направленными вдоль оси магнетрона, на два симметрично расположенных сегмента (или большее их число). На рис. 5 показана схема двухщелевого магнетрона, где K — катод, A_1, A_2 — сегменты анода, замкнутые накоротко проводником с небольшой распределенной самоиндукцией L и емкостью C (колебательный контур).

Самовозбуждение в этом магнетроне происходит при напряженности магнитного поля, близкой к $H_{кр}$, и резко уменьшенном через него токе. Вследствие случайного начального толчка, приводящего магнетрон к самовозбуждению, напряжение на сегментах анода становится неодинаковым. Допустим, что потенциал сегмента A_1 несколько выше, чем сегмента A_2 . Симметрия радиального электрического поля будет этим несколько нарушена. Деформация электрического поля у щелей такова, что электроны,двигающиеся параллельно поверхности анода, будут испытывать у правой щели торможение и, утратив часть своей кинетической энергии, окажутся отброшенными на сегмент A_2 , что увеличит его электроотрицательность по отношению к сегменту A_1 .

Увеличение разности потенциалов между сегментами A_1, 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 он 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. Частота самовозбуждающихся колебаний в этом магнетроне определяется электрическими параметрами (L и C , а стало быть, размерами и формой) полуанодов и замыкающей их цепи.

В том же 1924 г. Эрик Хабанн в университете города Иена (Германия) впервые исследовал двухщелевой магнетрон для своей докторской диссертации. Однако его магнетрон не смог генерировать колебания с

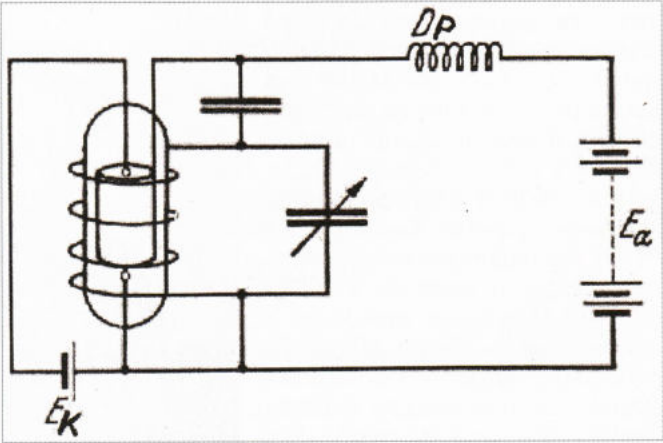


Рис. 3. Схема генератора на магнетроне Халла

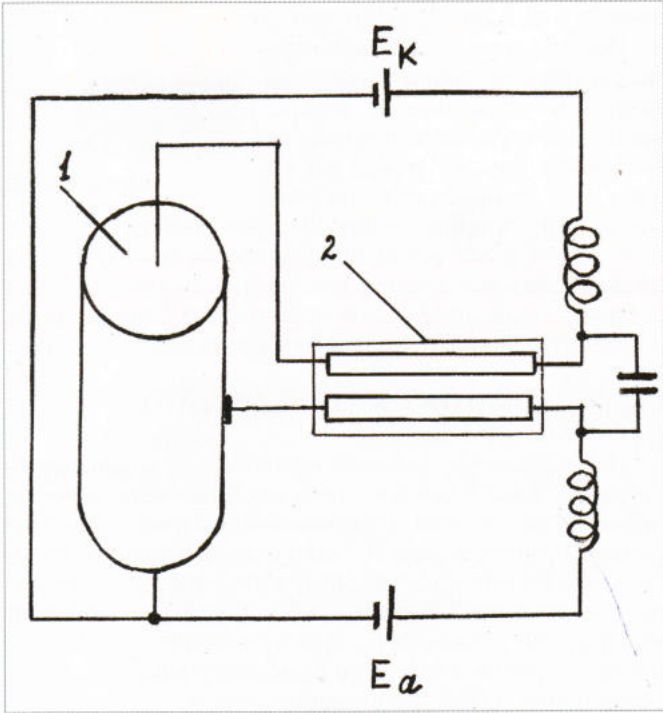


Рис. 4. Схема генератора на магнетроне Жашека

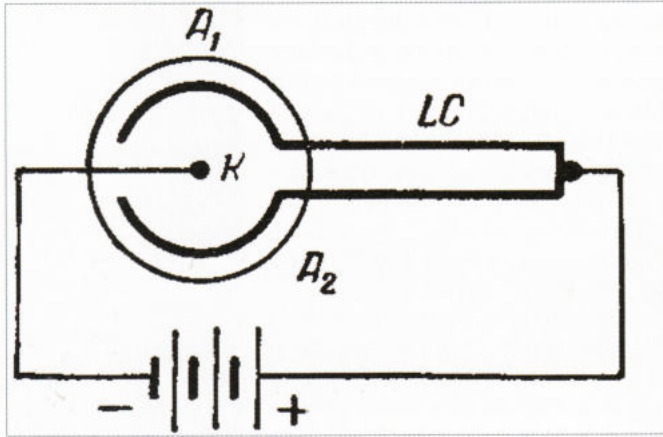


Рис. 5. Двухщелевой магнетрон

длиной волны короче 7 м. Первые же работы в СССР, начатые в 1924 г., были направлены на получение колебаний деци- и сантиметрового диапазона волн. В результате этих работ советские радиофизики Абрам Александрович Слущин, сотрудник Харьковского университета и его профессор с 1928 г., и профессор

этого же университета Дмитрий Самойлович Штейнберг создали магнетрон, генерировавший волны деци- и сантиметрового диапазона, а именно волны: длиной 60 см — в 1925 г., 30 см — в 1926 г., 7,6 см — в 1927 г. В Японии молодой электрофизик Кинийро Окабе из Императорского университета Тохоку (г. Сендай) в 1927 г. получил генерацию колебаний с длиной волны около 60 см, используя «разрезной» магнетрон с двухсегментным анодом. В 1929 г. Окабе добился в магнетроне с четырехсегментным анодом генерирования колебаний в диапазоне от 3 до 5 см.

Использование в магнетроне разрезного анода позволило повысить устойчивость высокочастотных колебаний в нем и их мощность, тем не менее на начало 30-х гг. прошлого столетия магнетрон оставался лабораторным прибором. Основная задача в его усовершенствовании заключалась в дальнейшем увеличении мощности генерируемых колебаний, необходимой для практического применения, и в продвижении в диапазон все более коротких волн.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА В НАЧАЛЕ 30-х гг.

Тем временем, в самом начале 30-х гг. прошлого столетия, радиолокация стала необходимой военным. Объяснялось это тем, что после Первой мировой войны техника противовоздушной обороны не получила достаточного развития. По-прежнему в этой обороне главную роль играли посты воздушного наблюдения, оповещения и связи, прожекторы, звукоуловители. Вследствие роста скорости самолетов-бомбардировщиков посты оповещения надо было выдвигать за 150 км и далее от защищаемого города и прокладывать к ним длинные телефонные линии. Однако эти посты не давали полной гарантии безопасности, так как наблюдатели не могли обнаружить самолеты, летящие на небольшой высоте. Ночью, в тумане или в облачную погоду такие посты вообще не видели самолеты и ограничивались сообщениями о «шуме моторов».

Прожекторы были надежны в борьбе против самолетов лишь в ясные ночи. При низкой облачности и в тумане они становились бесполезны. Специально разработанные звукоулавливатели тоже были слабым средством обнаружения, так как за то время, пока звук шел от самолета к звукоулавливателю, самолет пролетал расстояние, измеряемое в километрах, в связи с чем наводить зенитные орудия с помощью



Абрам Александрович Слуцкий

излучение частотой от 3 до 30 МГц, с последующим увеличением этой частоты;

✓ это излучение посылается в виде импульсов длительностью несколько микросекунд, разделенных между собой интервалами, во много раз превышающими длительность импульса;

✓ импульсы, отраженные от объектов, обнаруживаются и визуально отображаются в приемном оборудовании, расположенном в месте передачи;

✓ расстояние до объектов определяется путем измерения времени, за которое импульс распространяется от передатчика до цели и возвращается обратно;

✓ направление на цель определяется путем использования узконаправленных радиоантенн.

Своим развитием радиолокация во многом обязана некоторым электронным приборам, создаваемым одновременно с ней. Самый важный из них — электронно-лучевая трубка, получившая применение в начале 30-х гг. прошлого столетия в радиолaborаториях. Наиболее значительный вклад в усовершенствование этого прибора внесли немецкий физик, исследователь, изобретатель барон Манфред фон Арденне и американский физик и инженер Аллен Дюмонт, фирма которого Allen B. Du Mont Laboratories занималась конструированием электронно-лучевых трубок. И, конечно, радиолокация была бы невозможна без вакуумного триода.

Работы по созданию радиолокатора с использованием импульсного метода начались в Авиационной радиолaborатории ВМФ США под руководством Роберта Морриса Пейджа в 1934 г., но об этом, а также о том, как проходило создание радиол, — в продолжении статьи.



Дмитрий Самойлович Штейнберг

Продолжение следует