

О приоритете создания магнетронного генератора высокочастотных колебаний

На основе первоисточников установлен приоритет в идеи магнетрона и разработке источника магнетронных высокочастотных электрических колебаний (магнетронного генератора). Рассмотрены приоритетные идеи и разработки А. Халла, Д. А. Рожанского, А. Жачека, А. А. Слуцкина, Д. С. Штейнберга, Х. Яги и К. Окабе.

Ключевые слова: магнетрон, магнитное поле, магнетронный генератор, высокочастотные колебания, электрические колебания, электромагнитные колебания, магнетронные колебания, трехэлектродная лампа.

В 20-х годах XX ст. радиофизикам были известны два основных метода воздействия на пучок движущихся электронов: электростатическим или магнитным полем. Эти принципы использовались в электронных лампах для управления потоком электронов. К лампам первого типа относятся диод (кенотрон) и триод, второй тип представлен магнетроном. К тому времени возможности ламп первого типа были хорошо изучены, о магнетроне же было известно сравнительно мало. Поэтому первоначально для генерации незатухающих электромагнитных колебаний в радиотехнике использовался триод (в научном обиходе для него встречались также названия «радиотрон» в США, «усилительная лампа» или «катодное реле» в России и др.).

К середине 20-х годов существовало большое разнообразие генераторных схем на основе триода [1; 2], в которых период колебаний определялся величиной индуктивности и емкости внешнего колебательного контура. Длина волны колебаний в таких схемах изменялась от километров до 15 м [1]. В 1922 г. в Нижегородской радиолaborатории М. А. Бонч-Бруевичем [3], а затем Н. Никитиным и В. Татариновым [4] были разработаны схемы, позволяющие генерировать колебания с длиной волны 3–4 м

при сохранении мощности, достаточной для измерения ее ваттметром. В последующие годы, по мере усовершенствования методов и схем генерации коротких электромагнитных волн, минимальная длина волны была доведена до 2,8 м [2]. При исключительных условиях удавалось получить длины волн порядка 1 м и меньше. Например, в 1921 г. А. Данилевский своем докладе на VIII Электротехническом съезде сообщил о полученных им волнах длиной около 20 см. При этом использовались лампа с двумя анодами и двумя сетками.

Принципиально новый метод генерации коротких электромагнитных волн был открыт в 1920 г. немцами Г. Баркгаузенем [27] и К. Куртцем [5]. Они получили собственные колебания в вакуумном триоде с частой и тонкой сеткой при большом (до 500 В) положительном потенциале на ней и при меньшем отрицательном потенциале на аноде. Причиной колебаний они считали механические колебания облачка электронов от нити к отрицательному аноду и обратно около положительной сетки, однако теоретическая сторона явления им была не до конца ясна. Наиболее короткие волны, наблюдавшиеся Баркгаузенем и Куртцем, имели длину 43 см. На год раньше Виддингтон [6] обнаружил собственные колебания в газонаполненном триоде с

частотой, пропорциональной величине $\sqrt{e/m}$ для ионов данного газа и обратно пропорциональной расстоянию «нить – сетка» (здесь e и m – соответственно заряд и масса ионов). В дальнейшем метод Баркгаузена – Куртца в различных модификациях широко использовался в тех случаях, когда необходимо было получить мощные и устойчивые колебания очень высокой частоты, т. е. с длиной волны, меньшей 1 м. Так, К. Коль в результате длительного конструирования электронных ламп создал триод, способный генерировать волны длиной 30 см при напряжении на сетке 600 В [7]. Х. Хольманну, работавшему с французской лампой ТМС, удалось получить волны порядка 16 см и наблюдать волну в 13,2 см при напряжении на сетке 400 В [8]. Еще более существенных результатов в уменьшении длины волны и упрощении техники эксперимента удалось добиться В. И. Калинину из Физического института Саратовского университета [9]. Проводя опыты с лампой Г-1 Треста слабых токов, он получил устойчивые волны длиной 14,4–14,6 см, мощность которых, по его оценкам, превосходила мощность всех полученных ранее волн такого же порядка длины. Более того, с той же лампой он наблюдал волну длиной около 8 см, которая по ряду причин не могла быть практически использована.

Эти результаты были опубликованы в 1929 г. В 1927 г. отмечалось, что верхний предел частот генерируемых колебаний в схемах с использованием триода ограничивается не только недостаточной рациональностью применяемых методов, но и свойствами самих ламп [2]. Альтернативой использованию триода в генераторных схемах явился магнетронный метод генерирования электромагнитных колебаний, который был открыт в середине 20-х гг. и впоследствии развивался параллельно с дальнейшим совершенствованием схем на основе триода.

Первооткрывателем магнетрона считается американский физик А. Халл [2], который в 1916 г. запатентовал выдвинутый им принцип управления интенсивностью колебаний в диоде с помощью

переменного магнитного поля [10], а в 1921 г. опубликовал первое сообщение по теории магнетрона [12] и ввел термин «магнетрон» [11]. Первоначально магнетрон представлял собой цилиндрический диод, помещенный в однородное магнитное поле, параллельное его оси. Электроны, вылетающие из катода в таком диоде, испытывают воздействие со стороны взаимно перпендикулярных полей – электрического и магнитного, в результате чего при увеличении магнитного поля до некоторого критического значения ток через лампу прекращается. Критическая величина магнитного поля $H_{кр}$ может быть рассчитана по формуле:

$$H_{кр} = \sqrt{\frac{8mV}{eR}},$$

где R – радиус цилиндра анода, V – анодное напряжение, m и e – соответственно масса и заряд электрона [11; 12].

При несколько меньшем магнитном поле электронный поток уменьшается, оставаясь все же больше нуля, в результате чего характеристика магнетрона оказывается резко падающей. А. Халл показал, что для получения наибольшей крутизны характеристики необходимо, чтобы катод был расположен строго симметрично по отношению к аноду.

С 1913 г. А. Халл был сотрудником исследовательской лаборатории компании «Дженерал Электрик». В начале 20-х гг. он успешно занимался разработкой теории и исследованием возможностей применения магнетрона. С января 1920 г. по ноябрь 1921 г. он запатентовал пять заявок на различные вакуумные лампы, в которых применялся магнитный метод воздействия на электронный пучок. В своих работах 1921–1925 гг. А. Халл описал два типа магнетронов: в магнетронах первого типа катушка, создающая управляющее магнитное поле, является внешней по отношению к лампе [11]; в приборах второго типа управляющим фактором является магнитное поле нагрева нити [13].

Первые попытки использования магнетрона в качестве генератора были

сделаны вскоре после его открытия. В 1922–1923 гг. британская компания «Томсон – Хаустон» получила ряд патентов на различные применения магнетрона, в том числе в качестве генератора высокочастотных колебаний [14]. В схеме, разработанной специалистами компании, электромагнитные колебания возникали в результате взаимодействия разряда внешней емкости с электронным потоком и с магнитным полем катушки, намотанной на стеклянный баллон магнетрона. Модуляция высокочастотных колебаний колебаниями звуковой частоты осуществлялась путем воздействия цепи микрофона на управляющее магнитное поле магнетрона.

В 1924–1925 гг. работа магнетрона в качестве генератора изучалась в лаборатории «Дженерал Электрик» Г. Мерсером и Ф. Элдером. При этом применялись усилительные схемы, немного модифицированные для случая генератора, частота колебаний в которых определялась параметрами внешнего колебательного контура и сопротивлением нагрузки. Во второй части работы [15] детально описаны оборудование и условия, необходимые для эффективной работы генераторной схемы, содержащей магнетрон, приведены результаты многочисленных экспериментов, в которых была достигнута выходная мощность от 3 до 12 кВт на частотах, соответствующих длинам волн 12–15 км при анодном напряжении от 3 до 10 тыс. В. В статье представлены также результаты исследований восьми магнетронных ламп с различной длиной и диаметром анода. При этом отмечалось, что использование магнетрона в качестве генератора на высоких частотах ограничено трудностями, возникающими при создании необходимой величины управляющего переменного магнитного поля. Для получения высокочастотных колебаний, по мнению Ф. Элдера, проводимость катушки должна быть небольшой, а ток через нее – очень большим, т. е. катушка, создающая магнитное поле, должна состоять из нескольких витков.

А. Халлу и его коллегам из «Дженерал Электрик» не удалось обнаружить в

середине 20-х гг. собственные электромагнитные колебания в магнетроне. Тем не менее, в 1925 г. он отметил в одной из своих работ [13], что магнетрон способен генерировать высокочастотные колебания типа наблюдавшихся Баркгаузеном и Куртцем, хотя он сам не исследовал такую возможность. В 1924 г. была опубликована статья немецкого ученого Э. Хабанна из Йенского университета, в которой утверждалось, что отрицательное сопротивление магнетрона может явиться причиной возникновения колебаний с частотой, определяемой внешним резонансным контуром.

Важнейшее открытие, состоящее в том, что магнетрон в постоянном магнитном поле может генерировать собственные высокочастотные колебания, было сделано независимо в Чехословакии и в Украине, но оно оставалось практически неизвестным для ученых других стран вплоть до 1927–1928 гг., когда в Японии были опубликованы первые сообщения о коротковолновых магнетронных колебаниях, сразу же получившие широкую известность в США. Вследствие этого нередко можно встретить упоминания о японских ученых К. Окабе и Х. Яги как о первых исследователях высокочастотных свойств магнетрона. По этому поводу физик из Праги А. Жачек [27] в статье, опубликованной в 1928 г., писал: «В июньском номере Proc. Inst. Radio Eng. 16, с. 729, 1928 г-н Х. Яги описал методику, позволяющую получить короткие незатухающие электромагнитные волны при помощи магнетрона [17]. Точно такая же методика была разработана мной 4 года назад. Соответствующие письменные сообщения чешских авторов... были опубликованы в июньской тетради Casopis pro pest. mat. a fys. 53, с. 378, 1924... Методика защищена чехословацким патентом № 20293 (заявка подана 31 мая 1924 г., свидетельство выдано 15 февраля 1926 г.)» [16; 18].

В своих работах А. Жачек подробно описал процесс генерации незатухающих электрических колебаний в магнетроне. Для проведения опытов он использовал обычную выпрямительную лампу с ци-

цилиндрическим анодом диаметром около 8 мм, вдоль оси которого была натянута вольфрамовая проволока – катод прямого накала, эмиссия из которого составляла приблизительно 20 мА. Лампа была смонтирована в магнитной катушке таким образом, чтобы ось катушки совпала с катодом лампы, при этом силовые линии магнитного поля были параллельны нити накала. При помощи батареи, подключенной между нитью накала и анодом, на анод подавалось положительное напряжение, благодаря чему вылетающие из катода электроны приобретали радиальное ускорение по направлению к аноду. С увеличением интенсивности протекающего через катушку постоянного тока траектория электронов искривлялась, так что они двигались уже не перпендикулярно аноду, а под острым углом, тем меньшим, чем больше напряженность магнитного поля. При определенной критической интенсивности электроны уже не достигали анода, а по кривой возвращались к катоду. В этот момент в системе возникали электрические колебания, которые можно было наблюдать при помощи миллиамперметра, включенного в цепь анода. При дальнейшем возрастании напряженности магнитного поля анодный ток быстро снижался до нуля, одновременно исчезали колебания в системе.

Таким образом, А. Жачек экспериментально установил, что при наличии постоянного магнитного поля радиальное, непериодическое движение электронов в цилиндрическом диоде может быть преобразовано в криволинейное периодическое движение, что и «является причиной возникновения электрических колебаний по новому методу. При этом между катодом и анодом существует колебательная система, генерирующая незатухающие электрические колебания» [16; 18].

Исходя из результатов проведенных опытов А. Жачек пришел к заключению, что интенсивность колебаний достигает максимального значения при критической напряженности магнитного поля H_k , которая, в свою очередь, зависит

от величины анодного напряжения E_a . Длина волны колебаний λ зависит от диаметра анода, а также от величин H_k и E_a , причем эта зависимость может быть приближенно описана следующими формулами:

$$\lambda = a / H_k, \quad \lambda = A / \sqrt{E_a - B}, \quad \text{где } a, A, B - \text{ постоянные.}$$

Наиболее короткие волны, которые смог получить А. Жачек, имели длину 29 см при анодном напряжении 300 В.

Разработчики магнетронов из США, Японии и других стран ознакомились с методом, разработанным А. Жачеком, лишь после опубликования его статьи 1928 г. [1]. Там не менее, в более поздних публикациях зарубежных исследователей [19; 20] открытые магнетронного метода генерирования электромагнитных колебаний все же связывается иногда с именем А. Жачека, тогда как некоторые отечественные авторы называют в этой связи имена украинских ученых А. А. Слуцкина и Д. С. Штейнберга. К сожалению, ни в одной из известных публикаций в числе создателей магнетронного генератора не упоминается руководитель Харьковской научно-исследовательской кафедры физики Д. А. Рожанский [27], предложивший экспериментальный метод получения высокочастотных колебаний в магнитном поле почти одновременно с А. Жачеком и независимо от него. На IV съезде Российской ассоциации физиков, проходившем 15–20 сентября 1924 г. в Ленинграде, Д. А. Рожанский сделал сообщение об экспериментах, проведенных им в Ленинградском политехническом институте [22]. С помощью трехэлектродной лампы, включенной по схеме Баркгаузена и помещенной между полюсами электромагнита, он наблюдал возникновение колебаний с длиной волны, значительно меньшей (по предположению Рожанского), чем у колебаний, полученных методом Баркгаузена.

Сотрудник Харьковской кафедры физики А. А. Слуцкин впервые заинтересовался проблемой генерирования

высокочастотных колебаний, будучи еще студентом Харьковского университета [27]. В 1913–1915 гг. под руководством Д. А. Рожанского он изучал условия работы колебательного контура с искрой, а в 1919 г. начал эксперименты по генерированию колебаний по схеме Баркгаузена – Куртца, которые привели его к мысли о возможности замены положительной сетки триода внешним магнитным полем. В первых экспериментах 1924–1926 гг., предпринятых им совместно с Д. С. Штейнбергом по предложению Д. А. Рожанского, были получены магнетронные колебания длиной волны от 40 см до 3 м [23]. В 1928–1929 гг. харьковским ученым удалось уменьшить длину волны колебаний в сплошном магнетроне до 7,3 см. О полученных результатах они сообщили на заседании Харьковского кружка физиков в 1926 г., а также на V и VI съездах русских физиков в 1926 и 1928 гг. В своих исследованиях А. А. Слуцкий и Д. С. Штейнберг опирались на известные им работы А. Халла. Уже после опубликования своих результатов они получили возможность ознакомиться со статьей Х. Грейнахера [24], также изучавшего действие аксиального магнитного поля на движение электронов в цилиндрическом диоде. Оба автора ни разу не наблюдали возникновение согласованных колебаний электронов в диоде. Таким образом, исследования украинских ученых по обнаружению магнетронных колебаний носят полностью оригинальный характер.

В своих экспериментах А. А. Слуцкий и Д. С. Штейнберг использовали трехэлектродную лампу с цилиндрическим анодом и спиральной сеткой, включенную по схеме Баркгаузена. Анод лампы соединялся накоротко или с сеткой, или с катодом, почти не влияя на возникновение колебаний. Для обнаружения колебаний применялся метод симметричного детекторного мостика, состоявшего из двух конденсаторов, соединенных последовательно через кристаллический детектор и гальванометр. Интенсивность колебаний считалась пропорциональной отклонению стрелки гальваноме-

тра, длина волны определялась путем перемещения мостика вдоль лехеровой системы, включенной между сеткой и катодом. Необходимое магнитное поле напряженностью до 3000 Гс создавалось полукольцевым электромагнитом Дюбуа и вначале было ориентировано параллельно нити катода.

Наблюдая зависимость анодного тока от величины магнитного поля, А. А. Слуцкий и Д. С. Штейнберг обнаружили, что при определенных значениях напряженности магнитного поля можно наблюдать резкое возрастание тока между катодом и сеткой, что соответствует возникновению в лампе «быстрых электромагнитных колебаний». Их интенсивность довольно значительна и при благоприятных условиях может в десятки раз превышать интенсивность колебаний, полученных методом Баркгаузена – Куртца. В работе [22] показано, что интенсивность колебаний в описанной системе может изменяться в очень широких пределах и зависит от трех факторов: от величины магнитного и электрического полей, температуры нити, а также от положения лампы относительно магнитного поля и асимметрии в расположении ее частей.

В работе [23] отмечается, что измеренная интенсивность колебаний была наибольшей не при полном совпадении направлений магнитного поля и катода, а при некотором угле между ними, различном для разных ламп, однако не превышающем 50. В статье [22] приведены результаты многочисленных экспериментов по определению потенциалов на аноде, останавливающих анодный ток, частоты и интенсивности колебаний, зависимости анодного тока от азимута лампы относительно магнитного поля и др. Последний раздел работы [23] посвящен рассмотрению колебаний в аксиальном магнитном поле. «Интересной особенностью этих колебаний является то, — писали харьковские ученые, — что они наблюдаются между нитью и сеткой; анод никакого влияния на них не оказывает, так что для получения колебаний достаточно двухэлектродной лампы.

Длина волны этих колебаний порядка нескольких десятков сантиметров и зависит от силы как электрического, так и магнитного поля, а также от величины тока накала».

Рассматривая совместное действие на электрон, вылетевший из катода, однородного магнитного и цилиндрического электрического полей, А. А. Слуцкий и Д. С. Штейнберг качественно описали орбиту электрона и получили формулу для периода колебаний [23]. Однако периоды колебаний, рассчитанные по этой формуле, были всегда в несколько раз меньше наблюдавшихся в ходе эксперимента. Авторы объяснили это тем, что в трехэлектродной лампе, применявшейся в данной серии опытов, анодом служила сетка, в связи с чем характер электрического поля значительно отличался от цилиндрического. Для окончательного выяснения этого вопроса А. А. Слуцкий и Д. С. Штейнберг перешли к экспериментам со специальными лампами с цилиндрическим анодом.

По просьбе Д. А. Рожанского Трест малых токов изготовил диоды с анодом из немагнитного материала (тантала) диаметром 3,6 и 12 мм. Устойчивые и интенсивные колебания наблюдались в лампах с анодами 6 и 12 мм, с которыми и проводились дальнейшие исследования. Было обнаружено, что использование диодов в данной схеме имеет существенные отличия по сравнению с трехэлектродными лампами: во-первых, диоды отличаются значительно большей крутизной характеристики анодного тока; во-вторых, меньшей напряженностью магнитного поля, необходимого для почти полного прекращения тока через диод; в-третьих, той точкой характеристики, в которой наблюдаются электронные колебания. В то время как в триодах колебания возникали на падающем участке характеристики при самых различных значениях магнитного поля порядка нескольких сотен Гс, в диодах — в самом начале резко падающего участка характеристики в очень ограниченном интервале значений поля, не превышающих 5–7 Гс. Эти колебания авторы назвали «начальными» в отличие от колебаний значительно мень-

шей интенсивности, наблюдавшихся при сильных магнитных полях (1000 Гс).

А. А. Слуцкий и Д. С. Штейнберг провели серию опытов по изучению «начальных» колебаний. При изменении напряжения на аноде в пределах от 100 до 300 В подбиралось соответствующее магнитное поле, при котором возбуждались колебания, при этом наблюдались длины волн от 50 до 125 см. Абсолютные значения длины волны λ гораздо лучше соответствовали величинам, рассчитанным по формуле, чем для случая триода, но все же экспериментальные значения λ превышали теоретические приблизительно в 1,5 раза. Исследователи пришли к выводу, что это расхождение вызвано наличием пространственного заряда между катодом и анодом, который меняет характер электрического поля. Это подтверждалось также тем фактом, что при увеличении разогрева катода наблюдавшаяся длина волны всегда возрастала.

При этом формула для периода колебаний приобретает иной вид. Периоды, рассчитанные по ней, отличались от наблюдавшихся в ходе экспериментов всего лишь на 10%. По мнению харьковских ученых, большее совпадение нельзя было ожидать, т. к. при возникновении колебательного движения электронов структура поля неизбежно будет отличаться от той, которая описывается формулой Ленгмюра. Не делая окончательных выводов относительно физической природы колебаний, А. А. Слуцкий и Д. С. Штейнберг отмечали, что все полученные ими результаты позволяют считать причиной наблюдавшихся в диодах колебаний согласованные пульсации электронов между катодом и анодом, таким образом «магнитное поле является очень удобным средством для получения быстрых колебаний электронов в катодных лампах» [23].

Формула для периода колебаний в диодах, выведенная А. А. Слуцкиным и Д. С. Штейнбергом исходя из физических представлений о движении электронов в электрическом и магнитном полях, полностью подтверждает качественные зависимости, полученные ранее А. Жачеком на основе анализа опытных дан-

ных. Это свидетельствует об общности физических явлений, наблюдавшихся чешским и украинскими учеными, и подтверждает правильность предположений, сделанных А. А. Слуцкиным и Д. С. Штейнбергом при выводе своей формулы.

В этот же период аналогичные исследования, ставящие целью создание магнетронных генераторов для коротковолновых систем связи, проводились в Японии под руководством электрофизика Х. Яги, получившего в 1909 г. диплом инженера в Токийском университете. До Первой мировой войны он совершенствовался в Англии у Дж. Флеминга — изобретателя диода [27], во время своих посещений Дрездена работал вместе с Г. Баркгаузенем, впервые наблюдавшим высокочастотные колебания в вакуумном триоде с положительной сеткой [27]. С началом войны Х. Яги вернулся в Японию, где преподавал в университете города Сендай и получил в 1919 г. степень доктора наук. В начале 20-х гг. он узнал об изобретенном А. Халлом магнетроне от японского морского офицера, возвратившегося из поездки в США. Под руководством Х. Яги в Японии были начаты работы по использованию магнетрона для генерирования коротких радиоволн.

В 1928 г. Х. Яги посетил США, где опубликовал свою статью с изложением основных результатов исследования в области коротковолновой техники [17]. Второй ее раздел был посвящен описанию способов получения высокочастотных колебаний с помощью магнетронов различной конструкции. Здесь рассматривался принцип действия магнетрона и условия возникновения колебаний, приводились зависимости анодного тока от напряженности магнитного поля, построенные при различных значениях анодного напряжения. При небольших их величинах эти зависимости аналогичны характеристикам, полученным А. Халлом, а затем А. А. Слуцкиным и Д. С. Штейнбергом.

В ходе своих исследований возможности применения магнетрона в качестве генератора колебаний Х. Яги изучал

лампы различных конструкций: цилиндрический диод, триод, а также диод, в котором катод выполнен в виде прямой нити, а анод — в виде пластины. Было обнаружено, что любая из этих ламп может служить для генерации высокочастотных колебаний при достаточной величине анодного напряжения и соответствующей напряженности магнитного поля, однако для получения возможно более коротких волн предпочтительнее симметричная конструкции. Так, колебания с минимальной длиной волны в 12 см наблюдались в диоде с цилиндрическим анодом при анодном напряжении 1250 В. Для приближенной оценки длины волны колебаний в лампах различной конструкции Х. Яги пользовался полуэмпирической формулой.

Проведенное японским ученым исследование влияния геометрии лампы на величину высокочастотного выходного сигнала показало, что при конструировании магнетронов необходимо точное соблюдение пропорций. Так, для получения наиболее коротких волн диаметр анода должен уменьшаться, но при этом колебания становятся менее интенсивными. Отношение длины анода к его диаметру не должно быть слишком малым, в противном случае колебания едва различимы. При постоянном диаметре анода в цилиндрическом диоде наибольшей интенсивностью обладают колебания, возникающие при большем диаметре нити катода. Большое значение имеет расположение лампы в магнитном поле. Малейшее отклонение от центра катушки, создающей магнитное поле, ведет к значительному уменьшению интенсивности колебаний.

Наиболее существенное улучшение конструкции магнетрона, по мнению Х. Яги, может быть произведено, если цилиндрический анод разрезать на 2 или 4 сегмента узкими щелями, параллельными оси цилиндра. Каждый из анодных сегментов при этом образует резонансный контур, собственная частота которого зависит от емкости сегмента и индуктивности вывода. Путем настройки этих резонансных контуров можно добиться того, что эффект уменьшения длины волны с ростом анодного напря-

жения, наблюдавшийся Х. Яги в магнетронных лампах различных типов, становится практически незаметным.

Эти исследования были продолжены другим японским ученым К. Окабе, который провел эксперименты с различным расположением электродов в магнетроне и установил, что наибольшая выходная мощность может быть получена в магнетроне с разрезным анодом. В работе [17] Х. Яги отмечает, что такой магнетрон наилучшим образом может быть использован для генерации очень интенсивных колебаний с длиной волны около 40 см.

Во время посещения США Х. Яги не только широко пропагандировал достижения японских ученых в области высокочастотной радиотехники, но и посетил исследовательскую лабораторию «Дженерал Электрик», где был изобретен магнетрон. Это посещение и беседы, проведенные им в лаборатории, стимулировали начало разработки в США магнетронного генератора с частотой 400 МГц (что соответствует длине волны 75 см), который в начале 30-х гг. использовался специалистами из «Дженерал Электрик» при экспериментах с короткими радиоволнами.

Ведущим разработчиком японским магнетронов в 20-е гг. был ученик Х. Яги, К. Окабе, окончивший университет в 1922 г. и защитивший в 1928 г. докторскую диссертацию под руководством Х. Яги. В 1927 г. он сообщил об обнаружении магнетронных колебаний с длиной волны порядка 30 см [25]. К. Окабе запатентовал свое изобретение в Японии

в 1927 г. и в США в 1928 г. В начале 1929 г. в лаборатории профессора Яги, где работал К. Окабе, были расширены работы по изучению магнетронных колебаний, в результате чего получены мощные колебания с длиной волны 5,6 см. Это в два раза меньше, чем наименьшие значения длины волны колебаний в магнетронных генераторах, о которых сообщал в 1928 г. Х. Яги, в четыре раза меньше, чем наиболее короткие волны, полученные к тому времени по методу Баркгаузена – Куртца, и приблизительно в пять раз меньше, чем длины волн, наблюдавшиеся А. Жачеком в 1924 г. При этом К. Окабе утверждал, что практически нет препятствий к созданию магнетрона, генерирующего достаточно мощные колебания с длиной волны в несколько миллиметров. Если же не принимать во внимание интенсивность этих колебаний, то длина волны может быть еще меньшей. В статье «О коротковолновом пределе магнетронных колебаний» [26] К. Окабе приводит теоретическую и экспериментальную формулы для расчета минимального значения длины волны, которая может быть получена с помощью магнетронного генератора. Обе формулы отличались только постоянным множителем, свидетельствующем о том, что длина волны не зависит от приложенного к аноду напряжения и определяется напряженностью магнитного поля, причем автор утверждал, что обе эти характерные черты полностью подтверждаются проведенными экспериментами.

В работе [23] К. Окабе отмечал, что магнетронные колебания высокой ча-



А. Халл



А. Жачек



Д. С. Штейнберг



А. О. Слуцкий

стоты принадлежат к двум различным типам – А и В, причем частота колебаний А-типа практически не зависит от внешнего резонансного контура, а колебаний В-типа – существенно зависит от него. Наибольшая интенсивность колебаний была получена К. Окабе и Х. Яги для случая комбинации колебаний А- и В-типов. Колебания же, наблюдавшиеся А. Жачеком, принадлежат, по мнению К. Окабе, к А-типу.

Можно утверждать, что японские ученые внесли существенный вклад в исследование коротковолновых

свойств магнетрона, однако приоритет в экспериментальном обнаружении высокочастотных колебаний в магнетроне принадлежит, безусловно, чешскому физика А. Жачеку [18], а в их теоретическом описании – украинском ученым А. А. Слуцкину и Д. С. Штейнбергу [23]. В дальнейшем магнетронное направление стало ключевым в деятельности украинских ученых, развитие которого привело к созданию научной школы А. А. Слуцкиным и Института радиофизики и электроники АН УССР в Харькове.

1. *Введенский Б.* Термоэлектронная лампа как физический прибор / Б. Введенский // Успехи физ. наук. – 1923. – Т. 3. – Вып. 2–3. – С. 277–280.
2. *Миллер Ф. А.* О генерации весьма коротких электрических волн с помощью электронных ламп / Ф. А. Милллет // Журн. рус. физ.-хим. общ., ч. физ. – 1927. – Т. 59. – Вып. 3–4. – С. 281–301.
3. *В лаборатории М. А. Бонч-Бруевича* / Телегр. и телеф. без пров. – 1922. – № 15. – С. 589.
4. *Никитин Н.* Применение мощных катодных реле для получения коротких волн / Н. Никитин, В. Татаринов // Телегр. и телеф. без пров. – 1922. – № 16. – С. 685.
5. *Barkhausen H.* Die kurzesten, mit Vakuumrohren herstellbaren Wellen / H. Barkhausen, K. Kurts // Phys. Zeitschr. – 1920. – 21. – N 1. – S. 1–6.
6. *Whiddington R.* Ionic Oscillations in Three-Electrode Thermionic Valves / R. Whiddington // Radio Rev. – Nov. 1919. – 1. – P. 53.
7. *Kohl K.* Uber kurze ungedampfte elektrische Wellen / K. Kohl // Ann. d. Phys. – 1928. – 85. – H. 1. – S. 1–62.
8. *Hollmann H. E.* Ein Rohreosillator fur sehr kurze ungedampfte Wellen / H. E. Hollmann // Ann. d. Phys. – 1928. – 86. – H. 8. – S. 1062–1070.
9. *Калинин В. И.* О получении ультракоротких волн по схеме Баркгаузена – Куртца / В. И. Калинин // Журн. рус. физ. хим. общ., ч. физ. – 1929. – Т. 61. – Вып. 2. – С. 131–141.
10. *Глебова А. Н.* Магнетроны А. Халла / А. Н. Глебова // Матем. естествознание: фрагменты истории. – К., 1992. – С. 215–224.
11. *Hull A.* The Magnetron / A. Hull // AIEE Journ. – 1921. – 40. – N 9. – P. 715–723.
12. *Hull A.* The Motion of Electrons between Coaxial Cylinders in a Uniform Magnetic Field / A. Hull // Phys. Rev. – 1921. – 12. – N 4. – P. 539–540.
13. *Hull A.* The Motion of Electrons between Coaxial Cylinders under the Influence of Current Along the Axis / A. Hull // Phys. Rev. – 1925. – 25. – N 5. – P. 645–669.
14. *Макаревский Г. Н.* Магнетрон / Г. Н. Макаревский // Телегр. и телеф. без пров. – 1923. – № 19. – С. 205–206.
15. *Elder F.* The Magnetron Amplifier and Power Oscillator / F. Elder // Proc. IRE. – 1925. – 13. – N 2. – P. 159–188.
16. *Zacek A.* Ueber eine Methode zur Erzeugung von sehr kurzen electromagnetischen Wellen / A. Zacek // Zeitschr. f. Hochfreq. – 1928. – 32. – S. 172.
17. *Yagi H.* Beam Transmission of Ultra Short Waves / H. Yagi // Proc. IRE. – 1928. – 16. – N 6. – P. 715–741.
18. *Zacek A.* Nova methoda vytvoreni netlumenych cacilaci / A. Zacek // Casopis pro pest. mat. a fys. – 1924. – 53. – S. 378.
19. *Brittain J.* The Magnetron and the Beginning a of the Microwave Age / J. Brittain // Physics Today. – July 1985. – P. 60–67.
20. *Rice C.* Transmission and Reception of Centimeter Radio Waves / C. Rice // Gen. El. Rev. – 1936. – 39. – N 8. – P. 363–369.

21. Рожанский Д. А. О некоторых случаях действия магнитного поля на электронный разряд / Д. А. Рожанский // IV съезд русских физиков. – Л., 1924. – С. 41–42.
22. Слуцкий А. А. Получение колебаний в катодных лампах при помощи магнитного поля / А. А. Слуцкий, Д. С. Штейнберг // Журн. рус. физ.-хим. общ., ч. физ. – 1926. – Т. 58. – Вып. 2. – С. 395–407.
23. Greinacher H. // Verh. d. Deutsch. Physik. Gesellsch. – 1912. – 14. – S. 856.
24. Okabe K. Production of Extra Short Electromagnetic Waves by Split. – Anode Magnetron / K. Okabe // Proc. Imp. Acad. of Japan. – 1927. – 3. – N 8. – P. 514–515.
25. Okabe K. On the Short-Wave Limit of Magnetron Oscillations / K. Okabe // Proc. IRE. – 1929. – 17. – N 4. – P. 652–659.
26. Храмов Ю. А. История физики / Ю. А. Храмов. – К. : Феникс, 2006.

Получено 16.08.2016

А. М. Глбова

Про пріоритет створення магнетронного генератора високочастотних коливань

На основі періоджерел встановлено пріоритет в ідеї магнетрона та розробленні джерела магнетронних високочастотних електричних коливань (магнетронного генератора). Розглянуто пріоритетні ідеї та розробки А. Халла, Д. А. Рожанського, А. Жачека, А. О. Слуцькіна, Д. С. Штейнберга, Х. Ягі та К. Окабе.

Ключові слова: *магнетрон, магнітне поле, магнетронний генератор, високочастотні коливання, електричні коливання, електромагнітні коливання, магнетронні коливання, трьохелектродна лампа.*