

18
3-14 811

63



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Б.А. Загер, В.Г. Тишин

Р• 811

РЕЗОНАНСНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД
В ЦИКЛОТРОНЕ

ЖТФ, 1963, т 33, в 9, с 1121-1130.

Б.А. Загер, В.Г. Тишин

P- 811

РЕЗОНАНСНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД
В ЦИКЛОТРОНЕ

Направлено в ЖТФ

1254/2 гр.

Рассматривается механизм и условия существования низковольтного резонансного высокочастотного разряда /РВР/ и его влияние на режим работы циклотрона как в случае питания от в/ч генератора с независимым возбуждением, так и в случае автоколебательной системы.

Возникновение плазменного высокочастотного разряда в циклотроне приписывается влиянию РВР, что подтверждается опытом наладки и эксплуатации циклотрона ОИЯИ.

A mechanism and conditions for the existence of the low-voltage resonance high-frequency discharge multipactor effect are considered. The effect of this mechanism on the cyclotron operation is treated both for the supply from the high-frequency generator with independent excitation and for the self-oscillation system.

The appearance of the plasma high frequency discharge in the cyclotron is attributed to the multipactor effect what is confirmed by the experience gained during the adjustment and operation of the Joint Institute multiple-charged ion cyclotron.

1. Введение

Низковольтный резонансный высокочастотный разряд / multipactor effect, Р В Р / достаточно хорошо известен в ускорительной технике ^{/1-6/}. Возникая при определенных условиях в эвакуированных полостях резонаторов, этот вид разряда значительно усложняет работу ускорителя. В основном, существование Р В Р в резонаторе приводит к временному ухудшению вакуума, увеличению затухания, а если радиотехническая система ускорителя выполнена автоколебательной, то наличие разряда создает очень жесткий режим самовозбуждения. В циклотронной технике для ликвидации РВР приходится идти на значительные конструктивные и схемные усложнения радиотехнических устройств, применяя многокаскадные усилители с независимым возбуждением или бустерные генераторы и подачу постоянного смещения на дуанты в схемах с самовозбуждением ^{/1,2,3,4/}.

Ниже дается описание механизма РВР и оценивается влияние его на радиотехнические характеристики ускорителя, а также делается попытка объяснить ряд процессов, наблюдающихся при работе циклотрона многозарядных ионов ОИЯИ, возникновением РВР в резонаторе ускорителя.

2. Механизм РВР и условия, необходимые для существования разряда

Сущность механизма РВР сводится к следующему: Если к двум электродам находящимся в высоком вакууме /длина свободного пробега электрона много больше расстояния между электродами/, приложено высокочастотное напряжение достаточной амплитуды, то могут существовать такие условия, когда свободный электрон, находящийся на поверхности одного электрода, будет ускорен и пролетит расстояние между электродами за один полупериод или за несколько полупериодов колебаний высокочастотного напряжения.

Если при этом скорость электрона при соударении с электродом будет достаточной для создания вторичных электронов в количестве, большем 1, то аналогичное ускорение вторичных электронов приведет к возникнове-

нию лавинообразного процесса, нарастающего до тех пор, пока объемный заряд или мощность источника ВЧ напряжения не воспрепятствуют росту лавины. Таким образом, по истечении некоторого времени, между электродами будет существовать стационарный поток электронов, осциллирующих синхронно с частотой колебаний приложенного к электродам напряжения. Отбираемая от источника напряжения мощность, в этом случае, уже не будет чисто реактивной и ее активная составляющая естественно будет тратиться на нагрев электродов.

Если электроды образуют емкость колебательной системы, возникновение РВР неизбежно приведет к увеличению затухания резонансного контура и к уменьшению напряжения на емкости при неизменной подводимой мощности.

Рассмотрим условия, необходимые для существования РВР /7-10/.

Уравнение движения электрона, находящегося в высокочастотном электрическом поле, имеет следующий вид:

$$\ddot{x} = \frac{e}{m} \frac{U}{L} \sin(\omega t + \phi), \quad /1/$$

- где $\frac{e}{m}$ - отношение заряда к массе электрона;
 U - амплитуда ВЧ напряжения, приложенного к электродам;
 L - расстояние между электродами;
 ϕ - начальная фаза вылета электронов;
 ω - круговая частота колебаний ВЧ напряжения.

/Предполагается, что поле однородно, а вероятность соударения электрона с молекулами остаточного газа весьма мала/.

Решение уравнения движения с учетом времени пролета расстояния между электродами за нечетное количество полупериодов колебаний поля дает соотношение, связывающее амплитуду напряжения и фазу вылета электронов:

$$U = \frac{U_0 (1 - v_0 \frac{\pi}{\omega L})}{\sqrt{(2n+1)^2 \pi^2 + 4 \sin(\phi + \theta)}}, \quad /2/$$

где

$$U_0 = \frac{L^2 \omega^2}{e/m} = 2,26 \cdot 10^2 (Lf)^2 [\text{см}^2 \cdot \text{мггц}^2] \quad /3/$$

$$\theta = \arccos \frac{2}{\sqrt{(2n+1)^2 \pi^2 + 4}} ; \quad /4/$$

$n + 1$ - число полупериодов колебаний поля при пролете расстояния l ;

v_0 - начальная скорость вылета электронов.

Отметим, что для случая коаксиальных электродов выражение для U_0 примет следующий вид:

$$U_0 = \frac{(r_2^2 - r_1^2) \omega^2}{e} \frac{2r_2 r_2 l n \frac{r_2}{r_1}}{2 - r_1^2} ; \quad /5/$$

где r_2 и r_1 - радиусы наружного и внутреннего коаксиальных электродов.

Очевидно, что минимальное напряжение, необходимое для существования РВР равно:

$$U_{\min} = \frac{U_0 (1 - v_0 \frac{\pi}{\omega l})}{\sqrt{(2n+1)^2 \pi^2 + 4}} ; \quad /2a/$$

при этом начальная фаза вылета электронов равна $\phi_H = \frac{\pi}{2} - \theta$; где θ определяется выражением /4/.

При напряжениях, больших U_{\min} , начальная фаза электронов, участвующих в разряде будет определяться выражением /2/. Для каждого значения амплитуды U могут существовать два значения резонансной фазы. Можно показать, что для области фаз, меньших $\pi/2 - \theta$, скорость электрона при соударении с противоположным электродом увеличивается при уменьшении фазы, т.е. с увеличением напряжения, а для области фаз, больших $\pi/2 - \theta$, увеличение напряжения приводит к уменьшению скорости. При $\phi_H = \pi/2$ скорость при соударении равна начальной скорости вылета.

Кроме этого, можно показать, что устойчивость разряда /фокусировка фазы/ возможна лишь в области фаз, меньших $\pi/2 - \theta$.

Как уже было отмечено выше, для существования РВР необходимо, чтобы скорость, приобретаемая электроном при соударении с электродом была выше значения скорости, при котором коэффициент вторичной эмиссии /КВЭ/ равен единице.

Можно считать, что в процессе участвуют электроны с начальными

фазами, лежащими в некоторой ограниченной области. Граница начальных фаз при положительных углах определяется минимальной скоростью первичных электронов / при соударении с электродом/, граница отрицательных фаз определяется начальной скоростью вторичных электронов.

Максимальную скорость электроны приобретают при граничной отрицательной фазе.

Если вторичноэмиссионные свойства материала электродов таковы, что энергия электронов, имеющих максимальную скорость, меньше энергии, необходимой для получения КВЭ равного единице, то РВР не может развиваться.

Приближенное условие возможности существования РВР может быть получено при допущении, что начальная скорость равна нулю.

В этом случае максимальная скорость при соударении будет иметь место при нулевой граничной начальной фазе:

$$v_{\text{макс.}} = 2\omega L \frac{1}{(2n+1)\pi} \quad /6/$$

Если $E_{\text{макс}}$ - значение энергии электронов, при которой КВЭ равно 1, то условия существования разряда приобретают следующий вид:

$$L[\text{см}] \geq (2n+1)^2 \frac{\sqrt{E_{\text{макс}}[\text{эВ}]}}{f[\text{мггц}]} \quad 15. \quad /7/$$

Таким образом, очевидно, что РВР может существовать лишь при выполнении определенных соотношений между L, ω и $E_{\text{макс.}}$ и лишь в определенном интервале амплитуд.

Если энергия электронов при столкновении с электродом при $\phi = \pi/2 - \theta$ больше $E_{\text{макс.}}$, то нижняя граница определяется выражением $/2a/$, а верхняя граница - граничной отрицательной фазой вылета.

3. Влияние РВР на радиотехнические характеристики циклотрона

Условия, приведенные выше, были получены для случая, когда высокочастотное напряжение постоянно по всей поверхности электрода. Однако в объемных резонаторах ускорителей, в частности, в коаксиальных резонаторах

циклотронов, распределение напряжения по длине резонатора не является однородным.

Оценим влияние РВР на характеристики коаксиального /четвертьволнового/ резонатора. Считаем, что условия /7/ для расстояний между электродами резонатора выполняются и, если по длине резонатора имеется область напряжений, лежащая между двумя границами напряжений разряда, то в этой области возникает РВР. Кроме того, считаем, что:

1. Напряжение по длине резонатора распределяется синусоидально, т.е.

$$\psi = U_m \sin 2\pi \frac{\ell}{\lambda}, \quad /8/$$

где U_m - амплитуда напряжения на разомкнутом конце резонатора;
 ℓ - расстояние от замкнутого конца резонатора;
 λ - резонансная длина волны резонатора при четвертьволновом резонансе .

2. Сопротивление разряда на единицу длины электродов постоянно и равно r_p .

При существовании разряда на сопротивлении r_p будет выделяться активная мощность

$$P_{уд} = \frac{\psi^2}{r_p} \quad /9/$$

Учитывая распределение напряжения, будем иметь:

$$P_{уд} = \frac{1}{r_p} U_m^2 \sin^2 2\pi \frac{\ell}{\lambda} = \frac{1}{2r_p} U_m^2 (1 - \cos 4\pi \frac{\ell}{\lambda}). \quad /10/$$

На рис. 1 приведено схематическое изображение зависимости области существования разряда от величины амплитуды напряжения на разомкнутом конце резонатора. Видно, что при уменьшении амплитуды область увеличивается и сдвигается к разомкнутому концу.

Полная мощность, уходящая в разряд, будет равна:

$$P_p = \int_{\ell_ч}^{\ell_б} P_{уд} d\ell = \frac{1}{r_p} U_m^2 \int_{\ell_ч}^{\ell_б} \sin^2 2\pi \frac{\ell}{\lambda} d\ell, \quad /11/$$

где $\ell_ч$ и $\ell_б$ - границы существования разряда по длине резонатора.

Значения $\ell_ч$ и $\ell_б$ легко могут быть определены:

$$\ell_b = \frac{\lambda}{2\pi} \arcsin \frac{U_H}{U_m};$$

$$\ell_H = \frac{\lambda}{2\pi} \arcsin \frac{U_H}{U_m}.$$

/12/

Для РВР достаточно точно соблюдается соотношение $U_H \approx 2U_H$.

Подставляя в интеграл /11/ значения ℓ_H и ℓ_b /12/, получаем окончательное выражение для мощности, потребляемой разрядом P_p :

$$P_p = U_H^2 \frac{\lambda}{4\pi r_p} f\left(\frac{U_H}{U_m}\right), \quad /13/$$

где

$$f\left(\frac{U_H}{U_m}\right) = \left(\arcsin \frac{2U_H}{U_m} - \arcsin \frac{U_H}{U_m} \right) - \left(\frac{2U_H}{U_m} \sqrt{1 - \left(\frac{U_H}{U_m}\right)^2} - \frac{U_H}{U_m} \sqrt{1 - \left(\frac{U_H}{U_m}\right)^2} \right), \quad /14/$$

Добротность резонатора может быть представлена как отношение реактивной мощности, запасенной в резонаторе, к активной. /Считаем, что разряд не влияет на реактивные свойства резонатора/.

Тогда имеем:

$$Q = \frac{P_{peak}}{P_{ak}} = \frac{U_m^2 \beta}{U_m^2 \alpha + P_p} = Q_0 \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{4\pi r_p} \frac{1}{\alpha} f\left(\frac{U_H}{U_m}\right)}, \quad /15/$$

где β - коэффициент, зависящий от реактивных параметров контура;
 α - коэффициент, эквивалентный сопротивлению потерь в контуре без разряда;

$$Q_0 = \frac{\beta}{\alpha} \quad \text{- добротность контура без разряда.}$$

На рис. 2 приведена вычисленная в соответствии с выражением /14/ зависимость $f\left(\frac{U_H}{U_m}\right)$.

Как видно из хода кривой /рис. 2/, влияние функции $f\left(\frac{U_H}{U_m}\right)$ на добротность резонансной системы становится заметным при уменьшении амплитуды напряжения на дуантах U_m /ниже некоторой величины/ при неизменной частоте и геометрических размерах резонатора/. Таким образом, можно ожидать скачкообразных изменений добротности резонатора, а следовательно и напряжения на дуантах, при плавном изменении подводимой к нему колебательной мощности.

Подсоединение к разомкнутому концу четвертьволновой линии емкости дуантов не меняет характер процесса. Наоборот, в этом случае скачок напряжения будет более крутым, ибо подключенная емкость изменяет перераспределение реактивной мощности, увеличивая ее емкостную составляющую у разомкнутого конца линии.

На рис. 3 приведена снятая на циклотроне ОИЯИ зависимость напряжения на дуантах от анодного напряжения высокочастотного генератора.

Характер процесса полностью совпадает с выводами, сделанными выше. Гистерезисный ход легко может быть объяснен. Действительно, поскольку добротность резонансной системы при малых мощностях мала, то при подходе снизу для достижения тех значений напряжения, при которых происходит скачок, нужна большая мощность, чем при подходе сверху, когда добротность велика.

Возникновение РВР в резонаторе легко может быть обнаружено при импульсной работе генератора. В этом случае в момент запирающего генератора после окончания модулирующего импульса в резонаторе существуют собственные колебания, затухающие с постоянной времени пропорциональной добротности резонатора. На экспоненциально затухающем заднем фронте импульса дуантного напряжения должен существовать резкий скачок, соответствующий моменту равенства амплитуды дуантного напряжения величине, при которой добротность резко падает из-за влияния РВР. На рис. 4-8 приведены осциллограммы огибающей дуантного напряжения, снятые при различных значениях напряжения на дуантах циклотрона многозарядных ионов ОИЯИ.

На всех осциллограммах в конечной области заднего фронта импульса имеется характерный скачок, возникающий при сравнительно малой величине напряжения на дуантах. С уменьшением возбуждения резонатора этот скачок приближается к началу заднего фронта. Срыв напряжения /см.рис. 3/ происходит тогда, когда скачок совпадает с началом заднего фронта /см. рис. 8/.

Для непосредственного обнаружения РВР в резонаторе циклотрона МЗИ ОИЯИ авторами было проделано следующее: на внутреннюю поверх-

ность смотрового окна, находящегося между дуантами и закорачивающей пластиной, был нанесен люминофор. При максимальных напряжениях на дуантах по 120 кв люминофор не светился. Однако, при уменьшении дуантного напряжения, в районе 50-40 кв люминофор начинал ярко светиться, что могло быть вызвано только появлением в этом месте резонатора электронной лавины.

При дальнейшем уменьшении напряжения люминофор погасал. Все это достаточно убедительно доказывает существование РВР в резонаторе циклотрона.

4. Влияние РВР на свойства автоколебательной системы

При рассмотрении влияния РВР на характеристики коаксиального резонатора циклотрона считалось, что возбуждение резонатора производится от мощного автономного генератора. В этом случае достаточно просто могут быть получены высокие ускоряющие напряжения. Однако, стабильность ускоряющего напряжения для такой схемы будет определяться стабильностью собственной частоты резонатора. При больших геометрических размерах резонатора, влиянии пучка и значительных мощностях, вводимых в циклотрон, трудно ожидать хорошей стабильности. Принципиальное улучшение может быть получено или за счет введения автоподстройки собственной частоты резонатора, или в системах с самовозбуждением.

В последнем случае частота колебаний ускоряющего напряжения определяется целиком собственной частотой резонатора, и при изменении ее амплитуда ускоряющего напряжения будет оставаться неизменной.

Кроме этого, система с самовозбуждением может быть выполнена всего на одной мощной лампе, тогда как генераторы с независимым возбуждением выполняются многокаскадными с большим количеством ламп.

В связи со всем этим представляется интересным рассмотреть влияние РВР на свойства автоколебательной системы. Принципиальная схема такой системы показана на рис. 9. Резонатор представлен контуром, состоящим из L, C, R . Напряжение с емкостного делителя β , пропорциональ-

ное ускоряющему напряжению U_c подается на вход усилителя S , связанного индуктивно с контуром.

$$L \frac{dI_k}{dt} + I_k R + \frac{1}{C} \int I_k dt - M \frac{dI_a}{dt} = 0$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int I_k dt$$

$$I_a = S(U_{гк}) U_{гк}$$

/16/

$$U_{гк} = \beta U_c.$$

Решая систему /16/ относительно U_c , получаем дифференциальное уравнение:

$$\ddot{U}_c + \omega_0 [d(U_c) - M \omega_0 \beta S(\beta U_c)] \dot{U}_c + \omega_0^2 U_c = 0;$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad d = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\omega_0 L};$$

/17/

R - сопротивление потерь, учитывающее и активные потери мощности от РВР. Влияние временных характеристик разряда на процесс установления амплитуды в данном случае не учитывается. Считаем, что возбуждение автоколебательной системы происходит достаточно медленно и РВР успевает развиться.

Очевидно, что стационарный режим автоколебательной системы, описываемой уравнением /17/, будет существовать при равенстве нулю диссипативной функции.

Нелинейные функции $d(U_c)$ и $S(U_c)$ могут быть представлены следующим образом:

1. В соответствии с /15/ можно считать, что имеется область больших U_c , где Q - велико, а d - мало.

При некотором значении U_c происходит резкое увеличение d , а затем при $U_c < U_H$ РВР в резонаторе не существует и Q снова велико, а d - мало.

2. Крутизна S в области малых U_c - постоянна, затем с увеличением U_c монотонно уменьшается.

На рис. 10 представлены примерные зависимости затухания $d(U_c)$ и вносимого обратной связью отрицательного затухания $M \omega_0 \beta S(U_c)$.

Как видно из рисунка, имеются три значения U_c , соответствующие стационарному состоянию автоколебательной системы. Можно показать, что точки U'_{c_0} и U''_{c_0} являются устойчивыми предельными циклами, U''_{c_0} — неустойчивым предельным циклом.

Существование больших колебаний U'''_{c_0} в такой системе возможно только в том случае, если будет создан начальный толчок, превышающий U''_{c_0} . При меньших начальных условиях в системе будут существовать колебания с амплитудой U'_{c_0} .

Резюмируя, можно сказать, что в том случае, когда радиосхема циклотрона выполнена с самовозбуждением, возникновение РВР в резонаторе существенно изменяет режим генератора и для возбуждения больших напряжений необходимо применять специальные маломощные возбудители. В качестве примера может служить описанная в ^{/2/} радиотехническая система циклотрона с подвозбуждением от бустерного генератора. Сравнительно простое, но эффективное устройство для возбуждения описано в ^{/4/}, где применен искровой генератор затухающих колебаний. В момент пробоя искрового промежутка в резонаторе создается электрическое поле, превышающее область РВР.

Такой толчок позволяет раскатать автоколебательную систему до больших значений ускоряющего напряжения.

Рассмотрение способа ликвидации РВР с помощью постоянного смещения не является целью данной работы. Можно лишь указать, что подавая на электроды постоянное напряжение величиной порядка U_0 удается избежать возникновения РВР.

5. Возбуждение плазменного высокочастотного разряда в резонаторе циклотрона

Возникая в эвакуированном объеме ускорителя, РВР не только меняет радиотехнические характеристики резонансной системы, но и способствует развитию плазменного высокочастотного разряда. Этот разряд препятствует получению высоких ускоряющих напряжений, потребляя подводимую к резонатору высокочастотную мощность.

Возникновение такого разряда иногда наблюдалось на циклотроне МЗИ ОИЯИ. После разборки или длительных остановок ускорителя включение высокочастотного генератора вызывает интенсивное голубоватое свечение в эвакуированном объеме, сопровождающееся сильным искрением на стенках резонатора. Огибающая дуантного напряжения в этом случае имеет вид, приведенный на рис. 11.

Время существования такого разряда зависит от степени чистоты поверхности резонатора и длительности остановки ускорителя. Разряд может существовать от нескольких минут до нескольких часов.

Величина рабочего давления в циклотроне составляет $1 \cdot 10^{-5}$ - $6 \cdot 10^{-6}$ тор. При возникновении плазменного разряда давление увеличивается до $4 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-4}$ тор и затем медленно спадает. При давлении порядка $2 \cdot 10^{-5}$ разряд гаснет.

Если в момент прекращения разряда увеличить подводимую мощность, то снова возникнет разряд и погаснет лишь через некоторое время. Постепенно увеличивая среднюю мощность, можно довести ускоритель до такого состояния, что разряд не будет возникать и при максимальном напряжении на дуантах. На рис. 12 приведена кривая давления в резонаторе при его тренировке. Если система тренировалась при выключенном магнитном поле, то при включении поля снова возникает разряд и по истечении некоторого времени гаснет.

Было обнаружено, что этот разряд связан с наличием масла, попадающего из вакуумных насосов в откачиваемый объем. Если ловушки имеют хорошее охлаждение, то время существования разряда не превышает 1 часа. Появление большой течи в вакуумном объеме или отсутствие охлаждения ловушек приводит к попаданию в объем некоторого количества масла. При включении генератора в этом случае всегда возникает разряд и время его существования зависит от количества находящегося в объеме масла.

Если в объем попадает большое количество масла, то даже длительная тренировка ускорителя не приводит к исчезновению разряда. Приходится вскрывать резонатор и удалять из него масло.

Механизм возникновения плазменного высокочастотного разряда в циклотроне может быть следующим.

Как было показано выше, из-за непостоянства напряжения по длине резонатора в нем всегда будет существовать некоторая область низких напряжений, при которых возможен РВР. В местах ввода мощности в циклотроне / на витках связи / также будут низкие напряжения. В случае импульсной работы генератора РВР перемещается по длине резонатора во время свободных колебаний системы. Поток осциллирующих при РВР электронов бомбардирует поверхности электродов, что приводит к выделению с этих поверхностей газов и продуктов разложения масла^{/11/}.

В результате давление в объеме ускорителя возрастает, создаются благоприятные условия для ионизации газа и возникает плазменный высокочастотный разряд^{/11,12,13/}.

Масло под воздействием плазменного разряда будет разлагаться более интенсивно, разряд усилится и распространится по объему резонатора. По истечении некоторого времени процесс разложения масла прекратится, вакуум улучшится и разряд погаснет. На стенках резонатора в результате крекинга масла остается тонкая диэлектрическая пленка.

Искрение на стенках резонатора объясняется тем, что во время плазменного высокочастотного разряда пленка заряжается. При некотором потенциале происходит пробой пленки, сопровождающийся разбрызгиванием материала электрода. На поверхности образуются мелкие "кратеры".

В дальнейшем эта пленка выгорает, образуя слой углерода на поверхности электродов. Фотографии "кратеров" при увеличении показаны на рис. 13, 14.

Подтверждением того, что плазменный разряд возбуждается РВР, может служить и следующее:

Если при каком-то значении высокочастотной мощности в процессе тренировки циклотрона плазменный разряд исчезает, то его можно возбудить вновь, уменьшив подводимую мощность и возбудив РВР в районе дуантов. Тогда при увеличении мощности до прежнего значения снова возникает плазменный разряд.

З а к л ю ч е н и е

Приведенные выше оценки влияния РВР на режим работы циклотрона хорошо подтверждаются опытом наладки и эксплуатации ускорителя МЗИОИЯИ.

Возникновение плазменного высокочастотного разряда усложняет нормальный режим работы циклотрона. В случае генератора с независимым возбуждением это в основном затрудняет точную настройку на частоту резонансной системы и увеличивает время запуска ускорителя. В случае автоколебательной системы для возбуждения на дуантах больших напряжений необходимо применять специальные меры для ликвидации РВР или стараться свести его влияние к минимуму.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить профессора Г.Н. Флерова за интерес, проявленный к этой работе, и за полезные замечания при ее обсуждении.

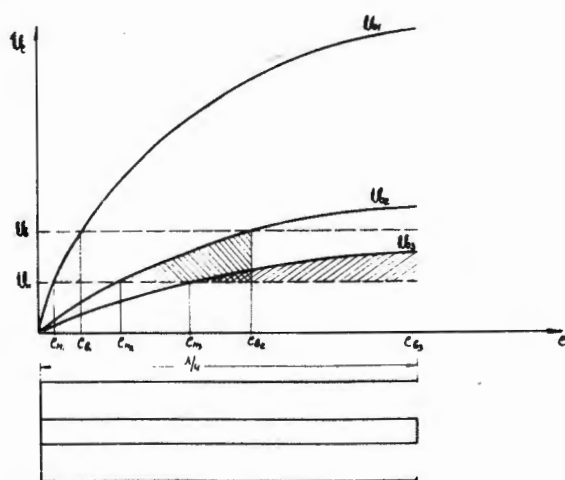
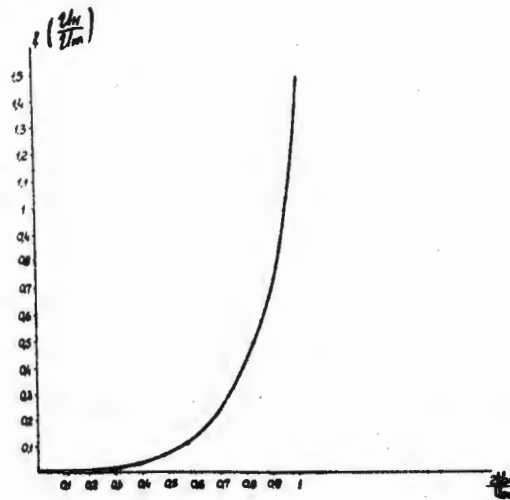
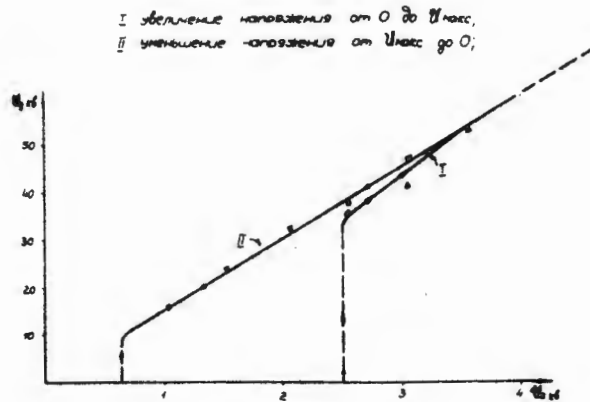


Рис. 1. Схематическое изображение зависимости области существования разряда в четвертьволновом коаксиальном резонаторе при изменении амплитуды напряжения.

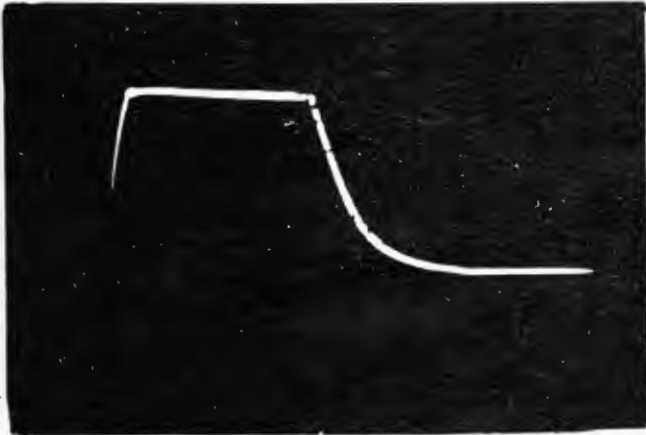


Р и с. 2. Зависимость $f = f\left(\frac{U_H}{U_m}\right)$

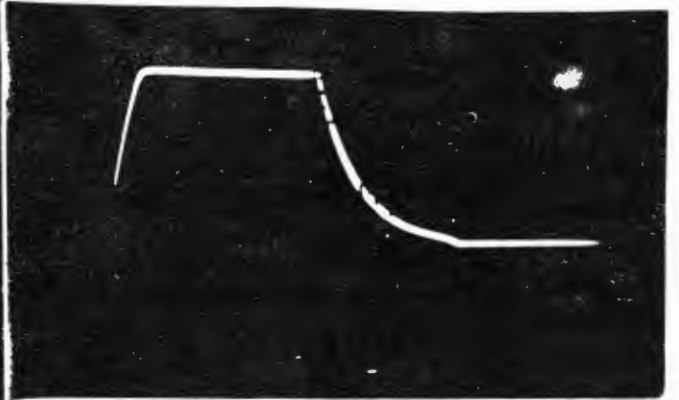


Р и с. 3. Экспериментальная зависимость напряжения на дуантах циклотрона от величины анодного напряжения высокочастотного генератора.

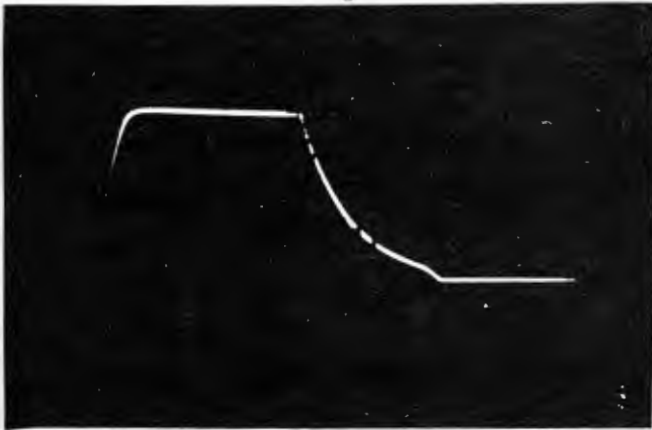
Формы импульса на дуантах циклотрона при изменении подводимой к нему высокочастотной мощности.



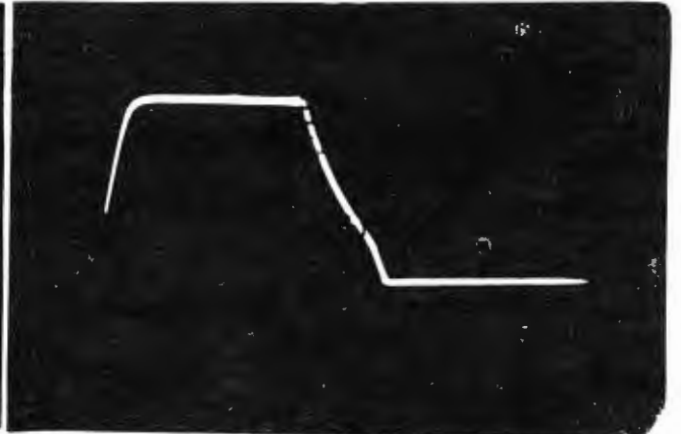
Р и с. 4. $\begin{cases} U_a = 11,5 \text{ кВ} \\ U_d = 160 \text{ кВ} \end{cases}$



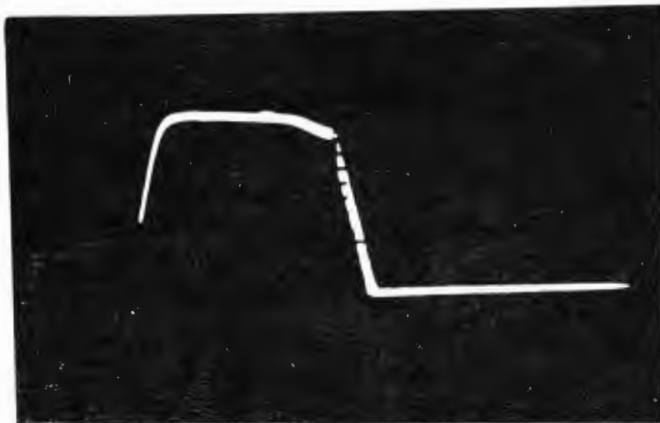
Р и с. 5. $\begin{cases} U_a = 3,8 \text{ кВ} \\ U_d = 50 \text{ кВ} \end{cases}$



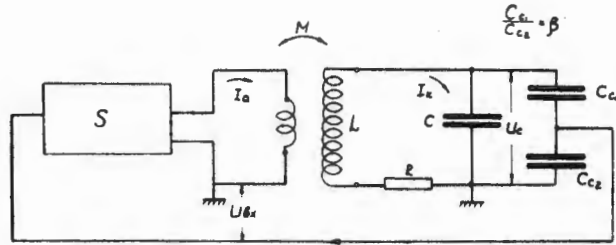
Р и с. 6. $\begin{cases} U_a = 2 \text{ кВ} \\ U_d = 28 \text{ кВ} \end{cases}$



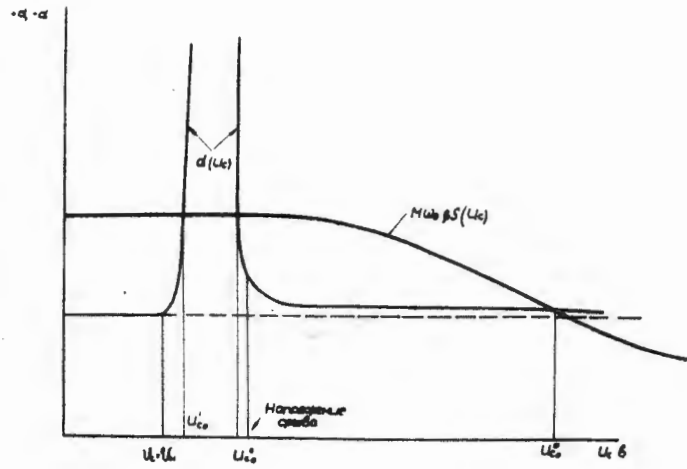
Р и с. 7. $\begin{cases} U_a = 1,5 \text{ кВ} \\ U_d = 18 \text{ кВ} \end{cases}$



Р и с. 8. $\begin{cases} U_a = 1 \text{ кВ} \\ U_d = 14 \text{ кВ} \end{cases}$



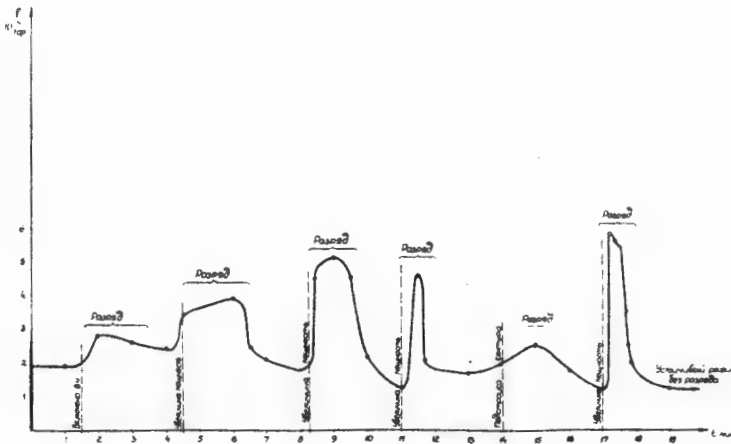
Р и с. 9. Принципиальная схема автоколебательной системы.



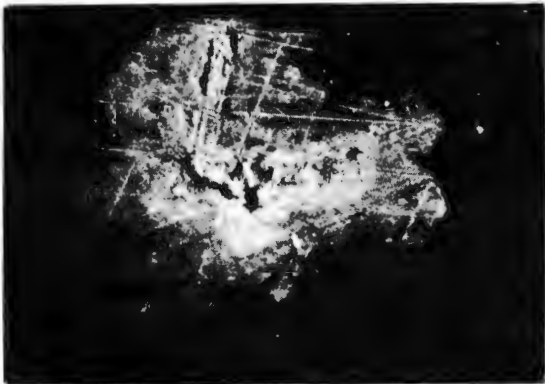
Р и с. 10. Зависимости $d(U_c)$ и $S(U_c)$



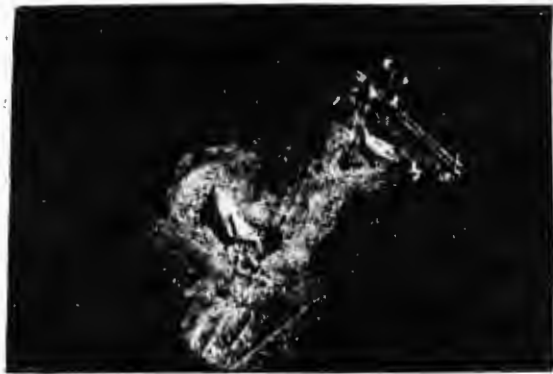
Р и с. 11. Форма импульса на дуантах циклотрона при возникновении в резонаторе плазменного разряда. Снизу видна верхушка модулирующего импульса.



Р и с. 12. Временная зависимость давления в резонаторе циклотрона при возникновении плазменного разряда.



Р и с. 13.



Р и с. 14.

"Кратеры" на стенках резонатора, возникающие при пробоях заряженной пленки.

Л и т е р а т у р а

1. D. Robert, S. Liwingston. Nature 9 (1952).
2. F. I. Schmidt, G. W. Farwell. RSI Vol 25, N 5 (1954).
3. Р. Бок, А. Деринг и др. "Атомная техника за рубежом" № 2, 1959 г.
4. H. W. Fulbright. The University of Rochester NYO 9359, AT(30 - 1) 8751 (1961).
5. V. J. Vanhuyse. Nuovo Cimento Vol X N4 (1958).
6. W. R. Baker. RSI Vol 32, N6 (1961).
7. Von K. Krebs. Zeit. fur Phys. 154 N 1 (1959).
8. E. W. Gill, A. Engel. Proc. Roy. Soc. A 192, 446 (1948).
9. A. J. Hatih, H. B. Williams. Phys. Rev. Vol 112, N 3, 681 (1958).
10. Ч. Tamagawa. Electrotec. Jour. of Japan Vol 3, N 3, 93 (1957).
11. W. K. Mansfield. Brit. Jour. of Appl. Phys. Vol 11, N 10, 449 (1960).
12. A. J. Hatch. Pros. of the Fourth. Inter. Conf. on Ion. Phenom. in Gases Uppsala. Vol 1 ПА 315 (1959).
13. Радиофизическая электроника под ред. Н. Л. Капцова. Издательство Московского университета, 1960 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 октября 1961 года.