

1058
18
3-14

ОБЪЕДИНЕННЫЙ И

ЛАБО

ИТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Б.А. Загер, В.Г. Тишин

1058

РЕЗОНАНСНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД
И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПОДАВЛЕНИЯ
ЖуТФ, 1964, т 34, в 2, с 297-306.

Б.А. Загер, В.Г. Тишин

1058

РЕЗОНАНСНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД
И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПОДАВЛЕНИЯ

Направлено в ЖТФ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1962 год

1611/2 38

А н н о т а ц и я

Описан механизм влияния постоянного напряжения на резонансный высокочастотный разряд. Получены граничные соотношения для РВР в зависимости от частоты колебаний и расстояния между электродами и рассмотрены возможности подавления резонансного разряда.

1. Введение

Существование некоторых эффектов в физической аппаратуре, где высокочастотное напряжение подается на электроды, находящиеся в вакууме, обычно приписывается проявлениям вторичной эмиссии с поверхности электродов. Считается, что главным источником осложнений, возникающих в эвакуированных резонаторах линейных и циклических ускорителей^{/1-5/}, является низковольтный резонансный высокочастотный разряд (РВР - *multiplier*). В частности, РВР полностью препятствует или серьезно затрудняет использование автогенераторов для получения высоких ускоряющих напряжений, вследствие неблагоприятного влияния на режим возбуждения генератора. Существует ряд способов, позволяющих уменьшить влияние РВР и преодолеть опасную область напряжений. В каждом конкретном случае используются различные методы, выбор которых связан с известными конструктивными затруднениями.

Наиболее радикальным способом решения данной проблемы явилось бы использование в резонаторах ускорителей металлов или покрытий с коэффициентом вторичной эмиссии (КВЭ) меньше 1. К сожалению, неизвестны металлы, удовлетворяющие этому условию и допускающие их использование в резонаторах с высокой добротностью. Желаемый эффект дает покрытие поверхности электродов рыхлым слоем сажи. Однако такой слой непрочен и графитизация стенок снижает добротность резонатора.

Одним из наиболее употребительных способов, служащих для устранения в резонаторах ускорителей нежелательных эффектов, является подача небольшого (по сравнению с ускоряющим) постоянного напряжения на электроды. Однако до сих пор нет единого взгляда на механизм действия постоянного смещения и критериев для оценки необходимой величины этого напряжения. Существует мнение, что постоянное смещение ("расчищающее" поле) "отсасывает" на стенки резонатора хаотически двигающиеся электроны и ионы^{/1,2/}, и тем самым препятствует возникновению светящегося разряда.

Авторы этой статьи, исходя из концепции, что инициатором плазменного разряда в резонаторе ускорителя является РВР^{/3/}, считают, что при подаче постоянного напряжения на электроды происходит нарушение фазовых условий вылета вторичных электронов, необходимых для возникновения и стабильного существования резонансного разряда.

В данной работе было изучено поведение границ РВР в области сравнительно низких частот, лежащих в диапазоне рабочих длин волн циклотронов. Теоретически оценена и экспериментально получена величина минимального постоянного напряжения смещения, необходимого для подавления разряда, в зависимости от произведения частоты колебаний на расстояние между электродами. Изучалась возможность пассивации электродов, в результате которой уменьшается КВЭ, не приводя к ухудшению добротности системы, и сделаны некоторые выводы.

Работа была предпринята, главным образом, для изучения условий возникновения РВР и способов его подавления, задача полного количественного описания этого явления не ставилась.

Поясним механизм РВР, полагая для простоты, что вторичные электроны вылетают с нулевой начальной скоростью и проходят межэлектродное расстояние под действием высокочастотного поля без соударения с молекулами остаточного газа.

Тогда при выполнении известных соотношений между начальной фазой вылета ϕ , длиной разрядного промежутка d , амплитудой приложенного напряжения U_m и частотой колебаний ω , первичный электрон попадает на противоположный электрод через один или несколько полупериодов в/ч напряжения со скоростью, достаточной для выбивания вторичных электронов в количестве больше 1. В результате периодического повторения этого процесса возникнет электронный поток, осциллирующий между электродами синхронно с частотой электрического поля.

Как показывают численные расчеты /8/, имеется начальная фаза ϕ , при которой после выполнения условий возбуждения электроны пролетают межэлектродный зазор точно за половину периода.

Для ожидаемой единственной начальной фазы вылета должна, в силу необходимости, существовать единственная скорость соударения V_k . (Здесь и далее все расчеты и рассуждения ведутся для одного "среднего" электрона, имеющего скорость вылета V_0 ; реальное распределение электронов по скоростям мы не учитываем).

Будем рассматривать систему, состоящую из двух плоских параллельных электродов, расположенных на расстоянии d . Уравнение движения электрона в однородном электрическом поле такой конфигурации, имеет вид:

$$\ddot{x} = \frac{e}{md} U_m \sin(\omega t + \phi). \quad (1)$$

Введем некоторую величину U_0 (с размерностью напряжения), зависящую от произведения частоты колебаний ω на длину зазора d :

$$U_0 = \frac{m}{e} \omega^2 d^2$$

(e и m - масса и заряд электрона).

Или в численной форме:

$$U_0 [B] = 2,26 \cdot 10^{-2} [fd]^2 [\text{мгн см}]^2 \quad (2)$$

Тогда, интегрируя (1), получаем:

$$\xi [\cos \phi - \cos(\phi + \theta)] + \beta_0 = \beta_k \quad (3)$$

$$\xi [\theta \cos \phi - \sin(\phi + \theta) + \sin \phi] + \beta_0 \theta = 1, \quad (4)$$

где амплитуда U_m и скорость электрона представлены в виде безразмерных величин:

$$\xi = \frac{U_m}{U_0}; \quad \beta_0 = \frac{V_0}{\omega d}; \quad \beta_k = \frac{V_k}{\omega d},$$

V_0 - начальная скорость вылета "среднего" электрона, V_k - конечная скорость соударения с электродом, θ - угол пролета электроном разрядного промежутка. Величиной β_0 можно пренебречь (при не слишком малых значениях fd), так как начальная скорость V_0

у вторичных электронов невелика. Тогда, для $\theta = \pi$ (разряды высших порядков не рассматриваем) из (4) получаем зависимость $\xi = \xi(\phi)$

$$\xi (\pi \cos \phi + 2 \sin \phi) = 1. \quad (5)$$

Покажем, что условия возбуждения РВР выполняются лишь в некотором интервале фаз и амплитуд.

Из (5) следует, что ξ имеет минимум при $\operatorname{tg} \phi = \frac{2}{\pi}$; $\phi = 32,5^\circ$. Значение этого угла становится ясным после рассмотрения условия фазовой устойчивости процесса, которое имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \phi} \Big|_{\theta=\pi} \leq 0$$

и из (4) получаем $\operatorname{tg} \phi \leq \frac{2}{\pi}$; $\phi \leq 32,5^\circ$, т.е. максимальный устойчивый угол вылета соответствует углу для минимального значения ξ , которое мы примем за нижнюю границу разрядной области. Условие фазовой устойчивости процесса допускает существование отрицательных фаз, которые ограничиваются лишь возможностью вылета электрона (величиной его начальной скорости). При нулевой скорости вылета $0 \leq \phi \leq 32,5^\circ$, и соответствующие значения ξ лежат в интервале: $0,269 \leq \xi \leq 0,319$, т.е. при фиксированном значении fd имеются две границы разрядной области - верхняя и нижняя.

Оценим влияние постоянного напряжения смещения на условия возникновения разряда. Знак напряжения смещения в симметричной системе не играет роли. Для определенности будем считать, что минус источника постоянного смещения подключен к электроду, расположенному в начале координат.

Тогда, уравнение (1) примет вид:

$$\ddot{x} = \frac{e}{md} [U_m \sin(\omega t + \phi) + E_{CM}]. \quad (6)$$

В данном случае необходимо рассматривать два уравнения движения, так как в зависимости от направления угол пролета электроном разрядного промежутка будет различным. Для выполнения резонансных соотношений, очевидно, необходимо, чтобы $\theta_1 + \theta_2 = 2\pi$, где θ_1 и θ_2 - углы пролета, соответствующие противоположным направлениям движения.

Представив напряжение смещения в виде:

$$U = \frac{E_{CM}}{U_0},$$

напишем два уравнения:

$$\xi [\theta_1 \cos \phi + \sin \phi - \sin(\phi + \theta_1)] + \frac{1}{2} \gamma \theta_1^2 + \beta_0 \theta_1 = 1 \quad (7)$$

$$\xi [(2\pi - \theta_1) \cos(\phi + \theta_1) + \sin(\phi + \theta_1) - \sin \phi] + \frac{1}{2} \gamma (2\pi - \theta_1)^2 - \beta_0 (2\pi - \theta_1) = -1; \quad (8)$$

Для качественного анализа процесса, целесообразно пренебречь величиной β_0 (как и в предыдущем случае), полагая, однако, что за счет начальной скорости вылет электронов может происходить и при тормозящем поле.

Из уравнений (8), (9) получаем:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{A(\gamma, \theta_1)}{B(\gamma, \theta_1)} ;$$

$$\xi = \frac{\sqrt{A^2(\gamma, \theta_1) + B^2(\gamma, \theta_1)}}{2(\pi - \theta_1)(\cos \theta_1 - 1) + \theta_1(2\pi - \theta_1) \sin \theta_1} ;$$

где

$$A(\gamma, \theta_1) \cong [\theta_1 + (2\pi - \theta_1) \cos \theta_1] + \frac{1}{2} \gamma \{ (2\pi - \theta_1)^2 (\theta_1 - \sin \theta_1) - \theta_1^2 [(2\pi - \theta_1) \cos \theta_1 + \sin \theta_1] \}$$

$$B(\gamma, \theta_1) \cong (2\pi - \theta_1) \sin \theta_1 + \frac{1}{2} \gamma \{ \theta_1^2 [\cos \theta_1 - 1 + (2\pi - \theta_1) \sin \theta_1] - (2\pi - \theta_1)^2 (1 - \cos \theta_1) \} .$$

Зная зависимости $\phi(\gamma, \theta_1)$ и $\xi(\gamma, \theta_1)$, можно построить функцию $\xi = \xi(\phi)$. Результаты расчета приведены на рис. 1. Необходимо отметить, что и при наличии постоянного напряжения смещения максимальный устойчивый угол вылета электрона, определяющий нижнюю границу области, остается прежним $\phi = 32,5^\circ$. Тогда влияние смещения на границы области можно интерпретировать следующим образом. Как видно из рис. 1, по мере увеличения γ , происходит сужение интервала фаз. Нижняя граница области поднимается, а для получения прежних значений ξ на верхней границе требуются все большие значения угла вылета ϕ . При некоторой величине смещения интервал фаз уменьшается настолько, что верхняя граница совпадает с нижней. Дальнейшее увеличение γ приведет к срыву межэлектродного резонансного разряда.

Наряду с возможностью существования двухэлектродного резонансного разряда вплоть до некоторого значения γ наличие постоянного тормозящего электрического поля создает условия для возбуждения на одном из электродов одноэлектродного резонансного разряда. Сущность его можно изложить следующим образом. Если электрон, вылетевший с начальной скоростью V_0 , в течение ускоряющей части периода высокочастотного поля не достиг противоположного электрода, то под действием тормозящей силы он изменит направление движения и столкнется с исходным электродом. Процесс может носить резонансный характер (аналогично двухэлектродному разряду), если угол пролета электроном в двух направлениях равен 2π , а энергия соударения достаточна для получения КВЭ больше 1.

Найдем условия возникновения и стабильного существования одноэлектродного РВР. Пусть положительное напряжение приложено к электроду, находящемуся в начале координат. Обозначим θ_1 - угол пролета, при котором $\dot{x} = 0$, $x < d$ (очевидно, что $\theta_1 > \pi$) и имея в виду, что при $\theta = 2\pi$, $\dot{x} = -V_k$, $x = 0$; после интегрирования уравнения движения, мы получим следующую систему уравнений:

$$\xi [\cos \phi - \cos(\phi + \theta_1)] - \gamma \theta_1 + \beta_0 = 0 \quad (9)$$

$$\xi [\theta_1 \cos \phi + \sin \phi - \sin(\phi + \theta_1)] - \frac{1}{2} \gamma \theta_1^2 + \beta_0 \theta_1 < 1 \quad (10)$$

$$\beta_k = 2\pi\gamma - \beta_0 \quad (11)$$

$$\xi = \frac{\pi \gamma - \beta_0}{\cos \phi} . \quad (12)$$

Рассматривая фазовую устойчивость процесса, которая имеет вид: $\frac{\partial \theta}{\partial \phi} |_{\theta=2\pi} < 0$, получаем выражение:

$$\xi \geq \frac{2\pi \gamma - \beta_0}{2\pi \sin \phi} . \quad (13)$$

Решая совместно (12) и (13), получим условие устойчивости в окончательном виде:

$$\xi \geq \frac{\pi \gamma}{2\pi \sin \phi - \cos \phi} . \quad (14)$$

Из (12), (14) видно, что область возможных фаз вылета электрона лежит в интервале $90^\circ > \phi > \theta^\circ$ (так как $2\pi \sin \phi - \cos \phi > 0$, $\text{tg } \phi > \frac{1}{2\pi}$, $\phi > 9^\circ$). Подставим (12) в выражения (9) и (10) и пренебрегая, как обычно, величиной β_0 , получим следующие выражения:

$$\text{tg } \phi = \frac{\theta_1 - \pi}{\pi \sin \theta_1} + \text{ctg } \theta_1 \quad (15)$$

$$\gamma < \frac{1}{\pi(\theta_1 - \sin \theta_1) + \pi \text{tg } \phi (1 - \cos \theta_1) - \frac{1}{2} \theta_1^2} . \quad (16)$$

Воспользовавшись (15) и (16), построим зависимость $\gamma = \gamma(\phi)$, а из (12) — $\xi = \xi(\phi)$. Эти кривые приведены на рис. 2 и позволяют изучить поведение границ области существования разряда в зависимости от величины смещения γ . Нижняя граница области находится после наложения условия устойчивости процесса (14), которое на рис. 2 изображено пунктирной линией. Верхняя граница определяется с помощью кривой максимально допустимых значений γ . На рис. 3 построена полученная таким образом функция $\xi = \xi(\gamma)$. Из хода этой кривой видно, что границы области сближаются при увеличении смещения и при значении $\gamma \approx 0,11$ одноэлектродный разряд должен прекратиться. Момент его возникновения определяется минимальной энергией соударения, необходимой для получения КВЭ > 1 .

Приведенный выше анализ движения электрона в электрическом поле сделан с некоторыми упрощениями: не учитывается зависимость распределения вторичных электронов по углам и скоростям вылета от энергии и угла падения первичных электронов, пренебрегается пространственным зарядом и влиянием неоднородности поля.

Несмотря на отмеченные недостатки, такой метод решения целесообразно использовать для качественного анализа резонансного разряда, вследствие его наглядности и простоты математических выкладок.

Для проверки сделанных здесь оценок и получения более точных количественных соотношений был поставлен эксперимент.

3. Аппаратура и методика эксперимента

Схематический вид экспериментальной установки показан на рис. 4. Она состоит из

мощного автогенератора, собранного по двухтактной схеме на лампах ГУ-22А, и стеклянного колокола с круглыми металлическими электродами. Верхний электрод неподвижно закреплен, а нижний может перемещаться по вертикали - положение его точно контролируется. Для уменьшения влияния краевых эффектов в разрядном промежутке диаметр электродов выбран максимально возможным и равным 20 см. Плавное изменение выходной мощности генератора осуществлялось с помощью индукционного фазорегулятора, который управляет моментом зажигания тиратронов выпрямителя и меняет величину анодного напряжения от 0 до 5 Кв. Во всем диапазоне частот от 9 до 23 мгц генератор развивает колебательную мощность, достаточную для получения на электродах необходимого напряжения без применения промежуточного резонансного контура.

Максимальное расстояние между электродами равно 15 см, и меняя его через 1 см, можно получать интересующие нас зависимости с малым шагом изменения fd . Высоко-частотное напряжение на электродах измерялось с точностью не хуже 3% статическими вольтметрами типа С-95.

Предварительное разрежение в объеме создавалось форвакуумным насосом типа РВН-20, высокий вакуум достигался с помощью агрегата типа ВА-0,5-1. На фланце вакуумного агрегата крепится заземленный электрод и имеются специальные отверстия для откачки стеклянного колокола. Уплотнение колокола на резиновом кольце оказалось надежным в работе и позволило получать рабочий вакуум $\approx 1 \cdot 10^{-5}$ тор. через 15 минут после напуска в объем атмосферы. Для измерения давления использовался стандартный манометр ВИТ-1 с датчиками ЛТ-2 и ЛМ-2.

При давлении $1 \cdot 10^{-5}$ тор. длина свободного пробега электронов много больше величины разрядного промежутка, ионизация молекул остаточного газа маловероятна, и пробойная напряженность поля слабо зависит от природы газа и его давления.

В /10/ приведены результаты исследования низковольтного разряда на частоте 15 мгц при длине зазора 15 см в широких пределах изменения давления. На воспроизводимом здесь рис. 5 показано, что при сравнительно высоком давлении вплоть до давлений порядка нескольких микрон, в объеме возникают различные модификации плазменного разряда. При дальнейшем улучшении вакуума появляются "плазмиды", которые исчезают при $\approx 1 \cdot 10^{-4}$ тор. Далее начинается область давлений, соответствующая "чистому" РВР. После возникновения РВР наблюдается характерное голубоватое свечение остаточного газа, обусловленное большой плотностью электронного тока лавины. (Скорости электронов, необходимые для получения КВЭ больше 1, много больше скоростей, требующихся для ионизации молекул любого газа).

Для идентификации границ разрядной области использовался постоянный ток, который появляется в цепи электродов, вследствие попадания части вторичных электронов на стенки сосуда. Измерение этого тока производилось при помощи многопредельного гальванометра т. М-95. Высоко-частотное напряжение генератора с витка связи подавалось на электроды через большую разделительную емкость.

После возбуждения РВР с поверхности электродов выделяются большие количества адсорбированного газа и продуктов разложения вакуумного масла. Несмотря на высокую

скорость откачки, давление в объеме может повыситься настолько, что возбудится плазменный разряд. Существование плазменного разряда в течение нескольких минут заметно меняет границы области, которые возвращаются к первоначальным значениям лишь по прошествии некоторого времени ^{/12/}.

Было замечено, что при длительной работе установки на электродах образуется радужное кольцо диэлектрической пленки. (О природе таких пленок и влиянии их на разряд существуют различные предположения ^{/4,5/}, приписывающие им важную роль при возбуждении разряда).

Чтобы избежать образования диэлектрической пленки и уменьшить вероятность возникновения плазменного разряда во время измерений, вакуумный агрегат был снабжен азотной вымораживающей ловушкой, а электроды перед работой тщательно промывались и обезгаживались под напряжением. Стенки колокола также могут являться дополнительным источником помех, поскольку попадающие на них электроны вызывают вторичную эмиссию со стекла и приводят к появлению заряда на стенках. Из-за ряда явлений, возникающих более или менее случайно, потенциал стекла может меняться, что приведет к непостоянству поля в разрядном промежутке и к двузначности (гистерезису) характеристик. Поэтому, внутренняя поверхность сосуда была покрыта проводящим слоем сажи, полученной от сжигания углеводородов.

Постоянное напряжение на электрод подавалось через развязывающий фильтр от селенового выпрямителя, напряжение которого изменялось от 0 до 500 в.

Для визуального обнаружения одноэлектродного разряда сделали следующее: в центре электродов помещалось небольшое количество чувствительного люминофора (виллемит). После возникновения разряда, по мере увеличения смещения, один люминофор постепенно погасал, тогда как другой, находящийся на электроде с положительным потенциалом, продолжал люминесцировать под действием электронной бомбардировки.

При измерении границ разрядной области было замечено, что разряд может протекать при напряжениях, значительно отличающихся от напряжения зажигания. По-видимому, это происходит из-за влияния пространственного заряда. Для устранения влияния пространственного заряда выходное напряжение генератора плавно подводилось к границам извне разрядной области. Напряжение самостоятельного зажигания, при котором появлялся постоянный ток в цепи электродов, принималось за границы области РВР.

Соблюдение всех указанных мер предосторожности позволило добиться повторяемости результатов и измерить граничные напряжения с удовлетворительной точностью.

4. Обсуждение результатов

На рис. 6 изображена область самостоятельного зажигания РВР по результатам эксперимента. Значения граничных напряжений совпадают с теорией в порядке величин, а также с данными других исследователей ^{/6-10, 12/}, занимавшихся анализом результатов с учетом начальных скоростей вылета электронов.

Заслуживает особого внимания наличие левой границы области в районе $fd \approx 90$ мгц.см. При меньших значениях fd разряд самостоятельно не возникает (полагают, что при этом

КВЭ равно единице). В ^{4/} дано значение $d/\lambda = 7,06 \cdot 10^{-3}$ ($fd \approx 230$), полученное из расчета, что КВЭ становится меньше единицы при энергии соударения 200 эв. В нашем случае, по-видимому, больше соответствует действительности энергия в 50 эв, приведенная в ^{8/}. (Специальные измерения минимальной энергии соударения не производились).

В определенных условиях наличие левой границы может оказаться полезным, например, в отдельных узлах физической аппаратуры, где возбуждение РВР является нежелательным. Заметим, что в камерах циклотронов значения fd по направлению магнитного поля обычно не превышают указанной величины. Это не более, как счастливое стечение обстоятельств, так как рабочая частота и размеры установки выбираются по другим соображениям.

Поведение верхней границы в области больших fd , где значение ξ близко к величине, вычисленной для нулевой фазы вылета электронов ($\xi = 0,319$), а также теоретическая зависимость $\xi = \xi(\phi)$, изображенная на рис. 1, позволяют думать, что двухэлектродный разряд должен прекращаться при $\gamma \approx 0,05$.

На рис. 7 приведена экспериментальная зависимость границ от величины смещения. Некоторое увеличение верхней и уменьшение нижней границы в районе $E_{см} = 50$ в может быть объяснено возникновением одноэлектродного разряда. Оценки, произведенные с помощью формулы (11) для $fd = 202$ мгц.см ($\gamma = 0,054$), дают значение энергии электрона в этой точке весьма близкое к 50 эв. При увеличении fd требующееся для возбуждения одноэлектродного разряда значение γ будет уменьшаться (т.е. при реально существующем распределении электронов по скоростям возможно одновременное существование обеих разновидностей разряда).

В дальнейшем характер поведения границ аналогичен рис. 3. Однако, как и следовало ожидать, имеются количественные расхождения, обусловленные влиянием начальных скоростей вылета.

Величина граничного напряжения смещения, при котором полностью прекращается разряд, показана на рис. 8. В области больших значений fd , где влияние начальной скорости меньше сказывается на результатах, получена величина $\gamma_{гр} \approx 0,16$, что следует считать хорошим совпадением с производившимися оценками, учитывая допущенные при этом значительные упрощения. Различное поведение разряда в зависимости от знака постоянного напряжения на верхнем электроде объясняется несимметрией нашей системы. Когда одноэлектродный разряд возбуждается на нижнем электроде, резко возрастают потери вторичных электронов и разряд прекращается раньше. (Слой сажи имеет потенциал нижнего электрода, что благоприятствует попаданию на него части электронов лавины).

На рис. 9 изображена в относительных единицах зависимость тока от напряжения смещения на верхнем электроде при фиксированном значении амплитуды высокочастотного напряжения. Значительное увеличение тока лавины при подаче малого смещения на электрод может быть использовано для улучшения кпд тех устройств, в которых РВР применяется для умножения частоты. (При заданном значении fd , выходная колебательная мощность определяется, главным образом, конвекционным током, величина которого ограничена пространственным зарядом).

Измерения проводились с электродами, изготовленными из нержавеющей стали. Ана-

логичные электроды из других металлов промышленной чистоты (Cu, Fe, Ti, Al) не привели к существенным изменениям границ разряда, что совпадает с наблюдениями Тамагавы^{/12/}. РВР не возникает совсем, если поверхность электродов покрыта рыхлым слоем сажи. Вероятно, при обычной степени загрязнения этих металлов, КВЭ близки между собой по величине (и больше 1).

Мы уже упоминали, что возникновение плазменного разряда приводит к изменению границ РВР. При срыве разряда кратковременным выключением генератора или путем улучшения вакуума, область существования РВР сужается или разряд прекращается совсем, как это происходит и при подаче постоянного смещения. В зависимости от состояния электродов и продолжительности плазменного разряда, время отсутствия РВР может быть различным.

Известно,^{/11/} что слой адсорбированных атомов и ионов на поверхности электрода влияет на работу выхода и меняет коэффициент вторичной эмиссии. Эффект обратимого отравления оксидных катодов, выражающийся во временном уменьшении электронной эмиссии (например,^{/13/}), наводит на мысль, что причиной прекращения РВР в нашем случае является уменьшение КВЭ вследствие адсорбции поверхностью электрода электроотрицательных ионов. Можно предположить, что большое количество отрицательных ионов кислорода, образующихся при плазменном разряде, создает на электроде тормозящее электрическое поле и увеличивает работу выхода. Со временем ионы рекомбинируют, и эмиссия постепенно восстанавливается. После продолжительной откачки, когда количество остаточного газа в объеме уменьшается, рецидивов отравления не наблюдалось.

Аналогичные результаты были получены при возбуждении плазменного разряда в атмосфере другого электроотрицательного газа-хлора. Была испытана также сера, незначительное количество которой помещалось непосредственно на медном электроде. С серой РВР прекращался на несколько десятков минут, причем эксперимент можно было повторять неограниченное число раз.

Несмотря на то, что осталась невыясненной зависимость продолжительности отравления от наличия на поверхности электродов слоя окиси и диэлектрической пленки, этот способ может быть использован для подавления резонансного разряда без ухудшения добротности резонатора. Для этого необходимо, чтобы в объеме присутствовало контролируемое количество отрицательных ионов отравляющего вещества, полученных тем или иным способом (термическим разложением в вакууме, в плазменном разряде или под действием ионизирующих излучений).

Таким образом, рассмотрение механизма РВР и различных способов его подавления, позволяет сделать следующие выводы.

1. При граничной величине постоянного смещения РВР прекращается в результате нарушения фазовых условий вылета вторичных электронов, необходимых для существования резонансного процесса. Для поля плоских электродов граничные соотношения выполняются с достаточной для практических оценок точностью при значениях $fd > 250$ мгц.см ($\gamma_{гр} \approx 0,16 \cdot \xi_B \approx 2\xi_H \approx 0,32$). Зная величину U_0 , легко найти абсолютную величину граничного смещения и вычислить область существования РВР.

2. Выбором величины $fd < 90$ мгц.см можно избежать возникновения разряда, так как при этом энергия соударения электронов в области резонансных напряжений недостаточна для получения КВЭ больше 1.

3. Разряд не возникает, если поверхность электродов покрыта веществом, имеющим мелкодисперсную структуру, или слоем электроотрицательных ионов, так как КВЭ поверхности становится меньше 1.

З а к л ю ч е н и е

Изучение резонансного разряда показало, что имеется несколько возможностей для его подавления, представляющих практический интерес. Для произвольной системы электродов граничные соотношения могут быть получены с помощью численных расчетов или, экспериментально, хотя порядок приведенных здесь величин, по-видимому, существенно не изменится.

Подача постоянного напряжения на электроды может использоваться не только для подавления РВР в резонаторах линейных и циклических ускорителей, но и в электронных переключателях, работающих на этом виде разряда.

Опасная (особенно для автогенераторов) область напряжений, при которых возможен РВР, преодолевается при большой скорости нарастания напряжения на электродах, превышающей скорость развития РВР. Однако процесс установления стационарного состояния разряда в данной работе не рассматривается.

Л и т е р а т у р а

1. Бок Р., Деринг А. и др. "Атомная техника за рубежом", № 2 (1959).
2. D.Robert, S.Livingston. Nature № 9 (1952).
3. Б.А.Загер, В.Г.Тишин. Препринт ОИЯИ, Р-811, (1961).
4. L.V.Mullet, R.E.Clay, R.I.B.Hadden. AERE. GP/R 1076. (1957).
5. D.K.Aitken. Proc. IRE. Vol. 105B. Suppl. № 12 (1958).
6. K.Krebs and H.Meerbach. Ann. Phys. 15. 189. (1955).
7. A.I.Hatch and H.B.Williams. J. Appl. Phys. Vol 25. № 4. (1954).
8. A.I.Hatch and H.B.Williams. Phys. Rev. Vol 112. № 3. (1958).
9. E.W.Gill and von Engel A. Proc. Roy. Soc. A 192. 446. (1948).
10. A.I.Hatch. Proc. of the Fourth Intern. Conf. on. Ion Phenom. in Gases Uppsala. Vol 1. 11A. 315 (1959).
11. Г.Брюнинг "Физика и применение вторичной электронной эмиссии", изд. "Советское радио" (1958).
12. H.Tamagawa. Electr. J.Japan. Vol. 3. № 2. (1957).
13. N.A.Surplace. Brit. J. Appl. Phys. Vol. 10. 359. (1959).

Рукопись поступила в издательский отдел
4 августа 1962 года.

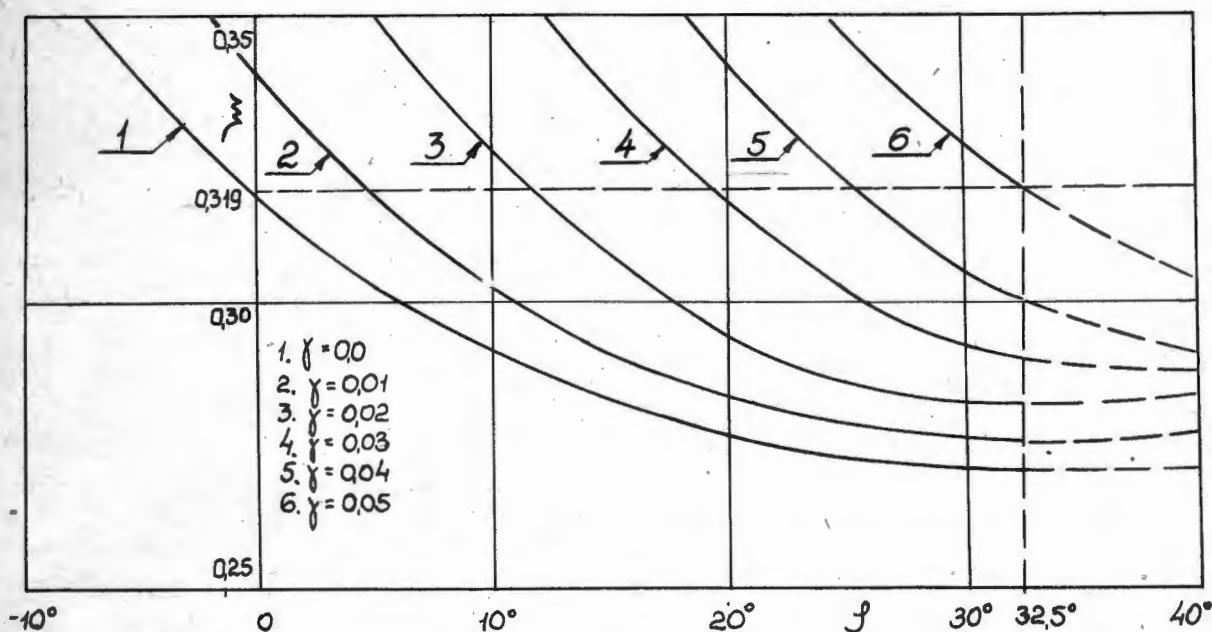


Рис. 1. Расчетная зависимость $\xi(\phi)$ для двухэлектродного резонансного разряда.

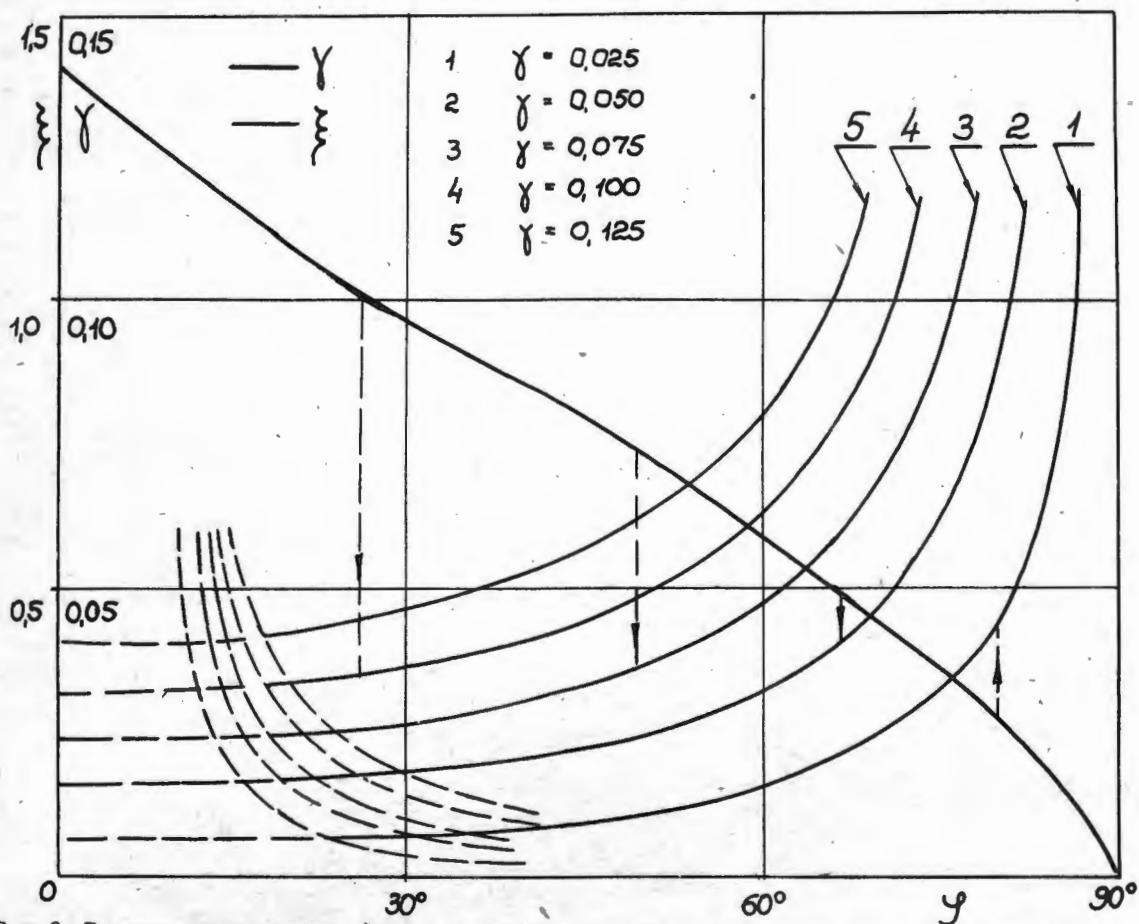


Рис. 2. Расчетная зависимость $\xi(\phi)$ и кривая максимально допустимых значений γ для одноэлектродного разряда.

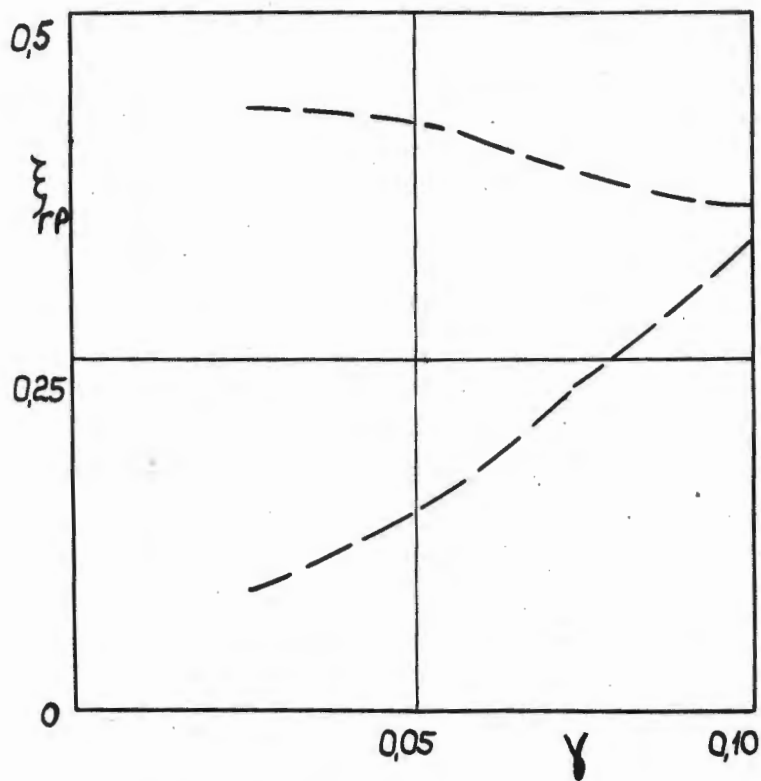


Рис. 3. Расчетные границы одноэлектродного резонансного разряда $\xi_{rp}(\gamma)$

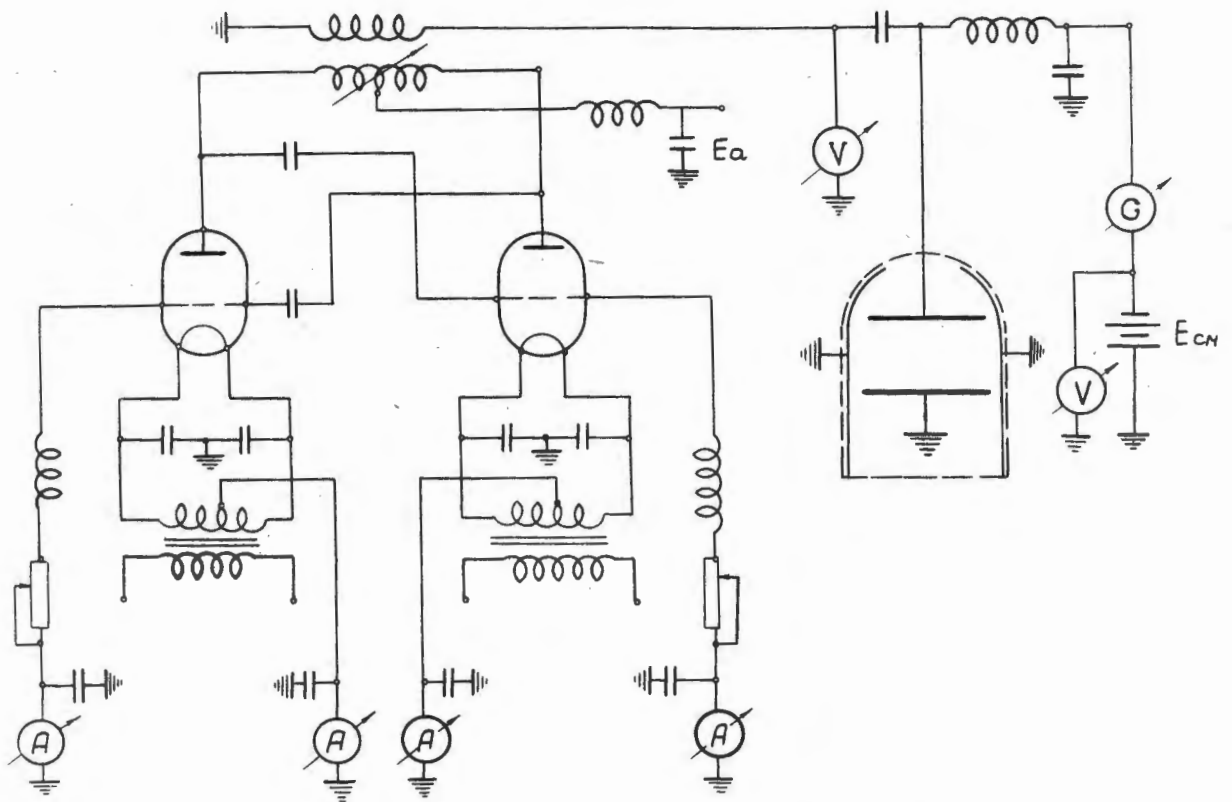


Рис. 4. Принципиальная схема установки.

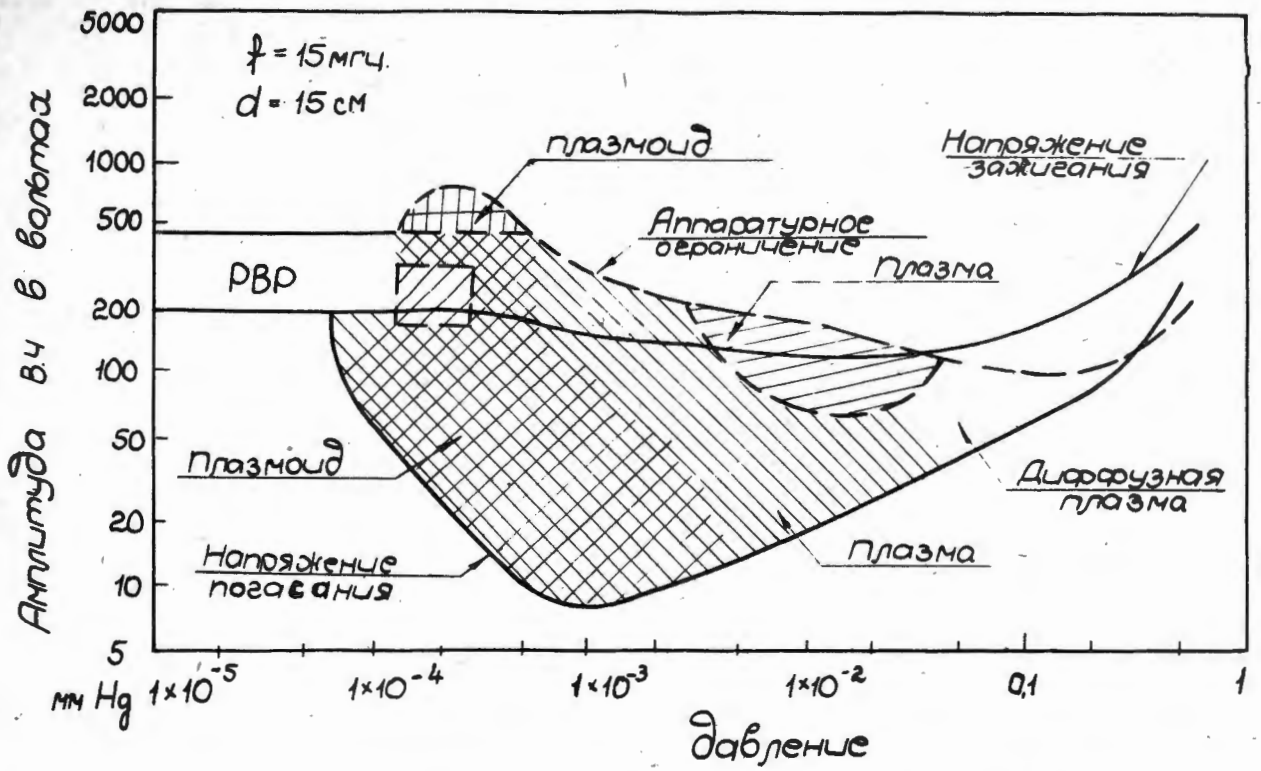


Рис. 5. Область существования низковольтного высокочастотного разряда в зависимости от давления ($d = 15 \text{ см}$ $f = 15 \text{ МГц}$).

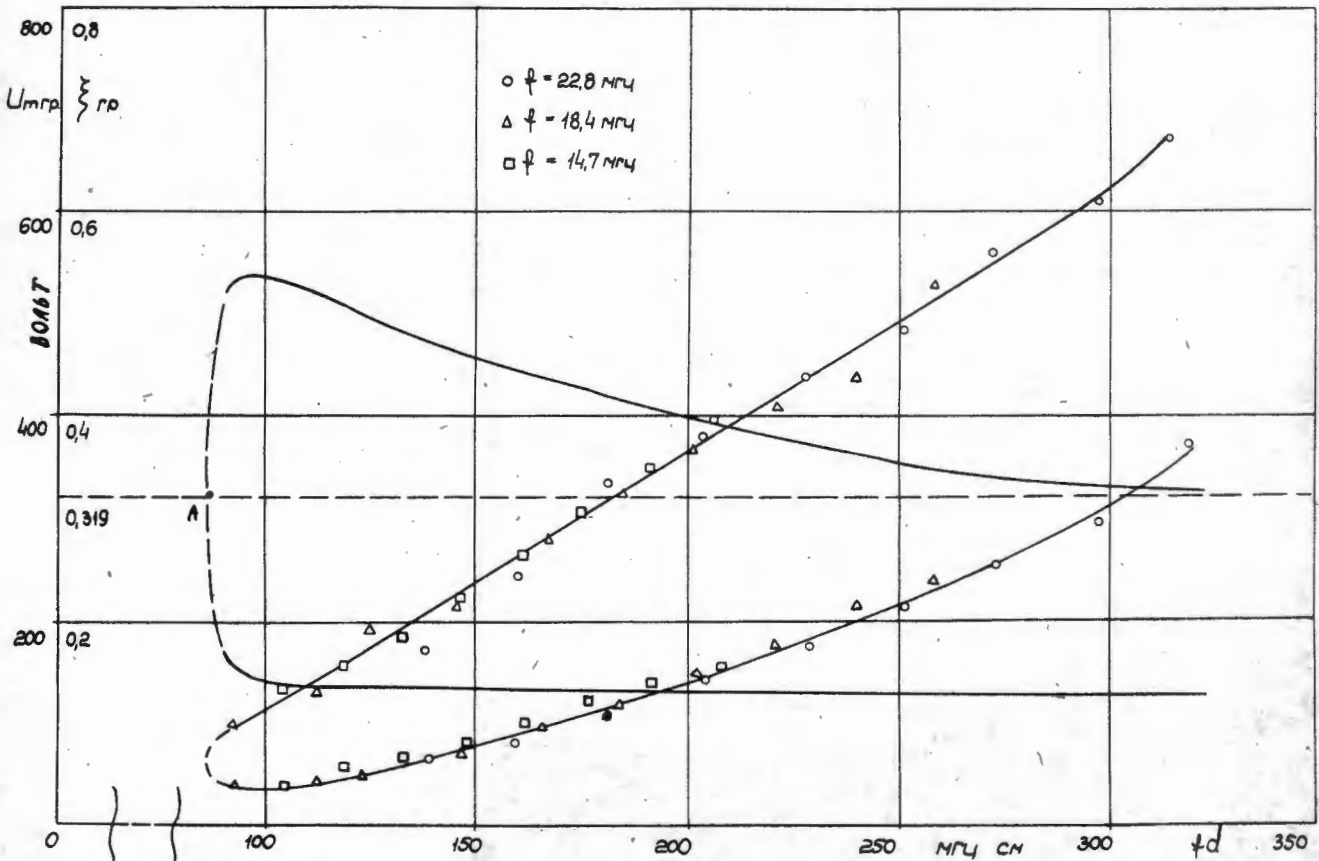


Рис. 6. Экспериментальная область самостоятельного возникновения резонансного разряда ($p < 1.0 \cdot 10^{-5} \text{ тор}$)

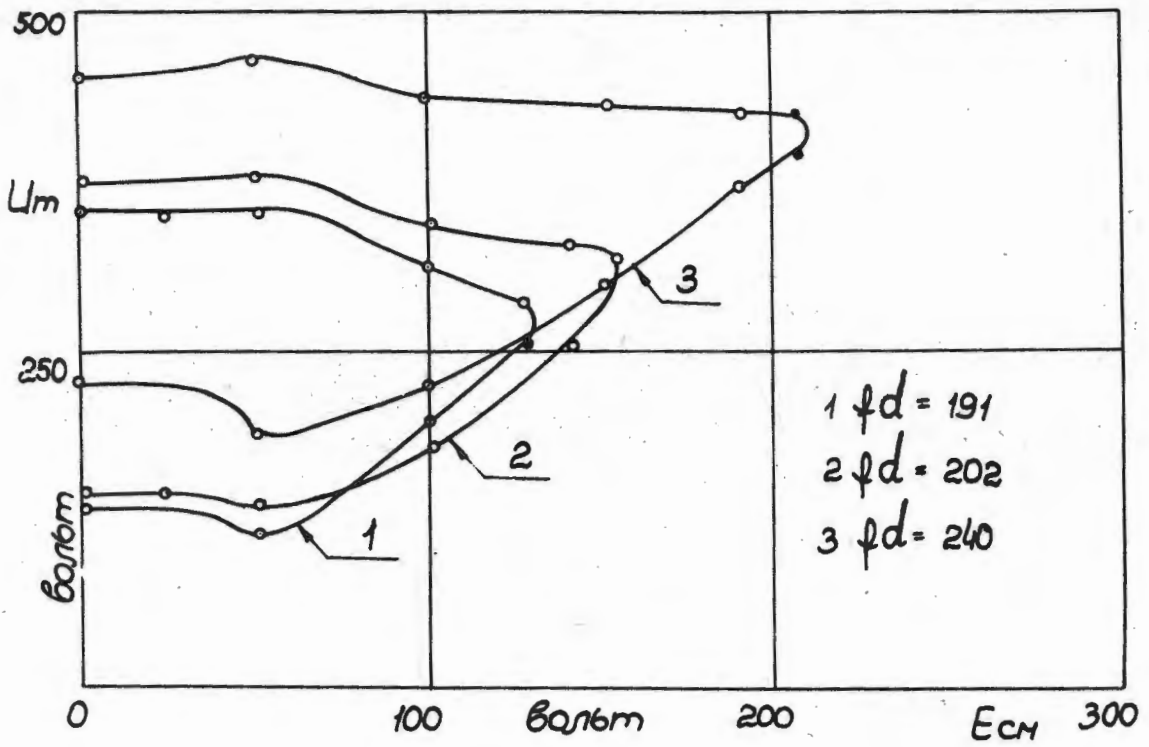


Рис. 7. Экспериментальная зависимость границ разряда от напряжения смещения.

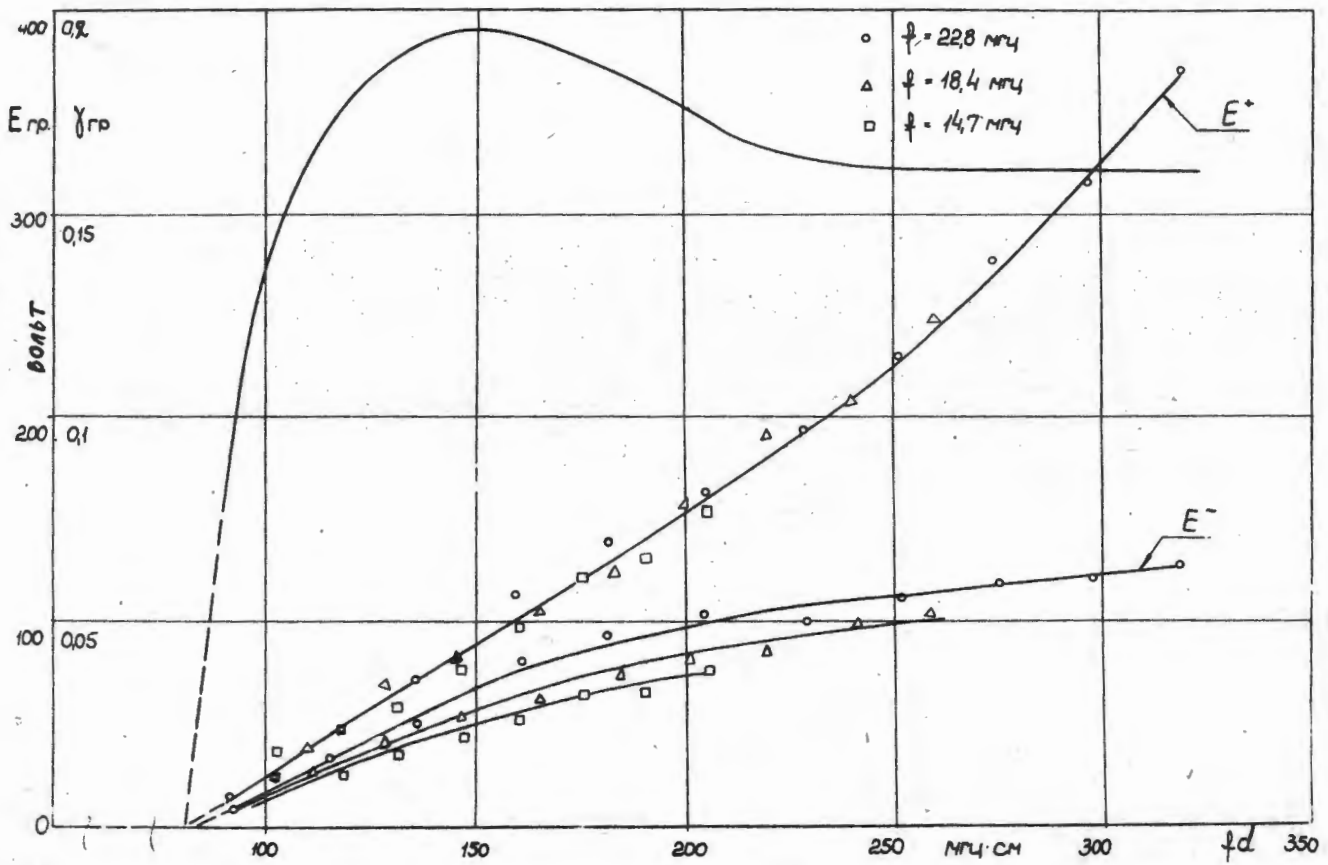


Рис. 8. Кривые граничного напряжения смещения.

1611/2 чр

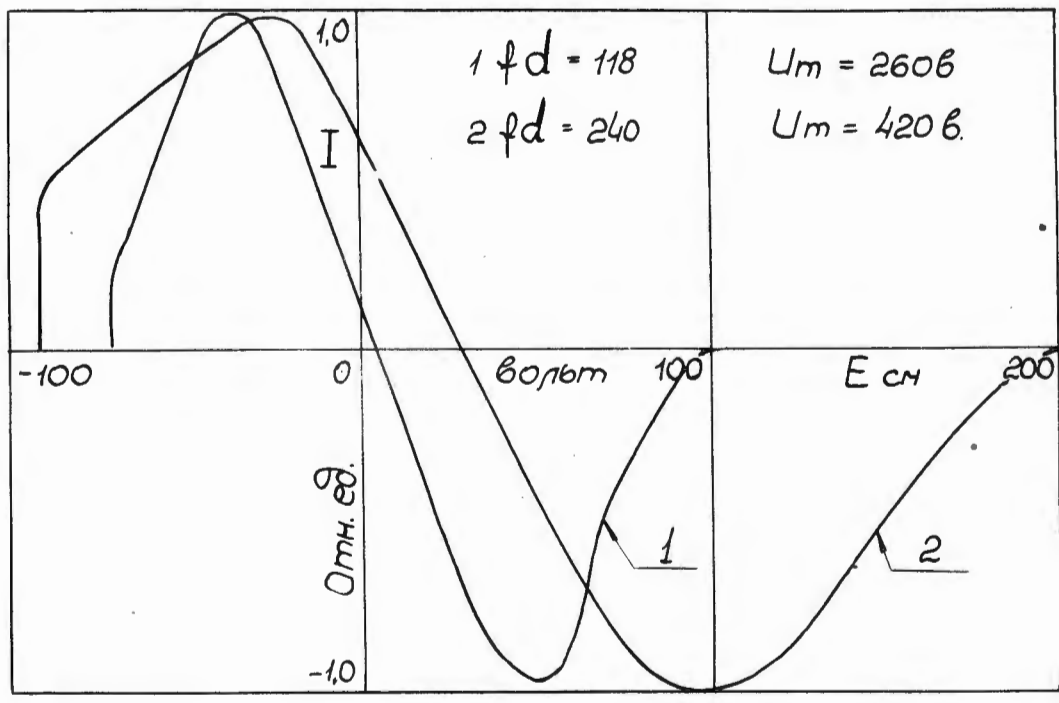


Рис. 9. Зависимость постоянного тока в цепи электродов от величины смещения.