

2

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р

И Я Ф 9 - 73

И.К.Седяров, В.Д.Шемелин

РЕЗОНАНСНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД
В ТОРОИДАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ

Новосибирск

1973

РЕЗОНАНСНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД В ТОРОИДАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследовались условия возникновения резонансного высоко-
частотного разряда (РВР) в тороидальном резонаторе на частоте
 $f = 430$ мкк. Проведены оценочные расчеты и экспериментальное
определение областей существования РВР и энергетического спект-
ра электронов, участвующих в нем. Рассмотрены способы подавле-
ния РВР путем подачи смещения на промежуточный электрод, а так-
же путем тренировки поверхности тлеющим разрядом.

ВВЕДЕНИЕ

Тороидальный резонатор, возбуждаемый на основе типа ко-
лебания В₀₁₀, можно условно разделить на две области (рис. 1а).
Между выступами (область I) ВЧ электрическое поле имеет акси-
альную составляющую (E_z) составляющую, которая слабо изменяет-
ся по радиусу. В области II ВЧ электрическое поле неоднородно и
слабеет по радиусу. Расчет напряжений возникновения РВР затруд-
нен, необходимо учитывать влияние ВЧ магнитного поля.

Для оценки границ зон существования РВР в области I воспользуемся данными работы [2], полученными для случая идеального конденсатора:

$$U_n = \frac{V}{\frac{k+1}{k-1} (2n-1) \pi \cos \varphi + 2 \sin \varphi} \quad (1)$$

В в е д е н и е

Изучению резонансного высокочастотного разряда (РВР) в вакуумном промежутке посвящено большое число работ. В основном разряд исследовался между плоскими пластинами /1-3/, в меньшей части работ рассматривался РВР в замкнутых резонансных системах /4-6/. Неполнота экспериментальных данных, особенно для объемных резонаторов с большой величиной произведения частоты на пролетный зазор ($f d$), требует при проектировании мощных ВЧ систем оценки возможности возникновения в них РВР. Поскольку в уравнения /1/, характеризующие границы зон разряда, частота и зазор входят только в виде произведения ($f d$), то РВР в большом резонаторе можно моделировать на уменьшенном макете с той же геометрией, т.к. при пропорциональном изменении всех размеров величина $f d$ сохраняется.

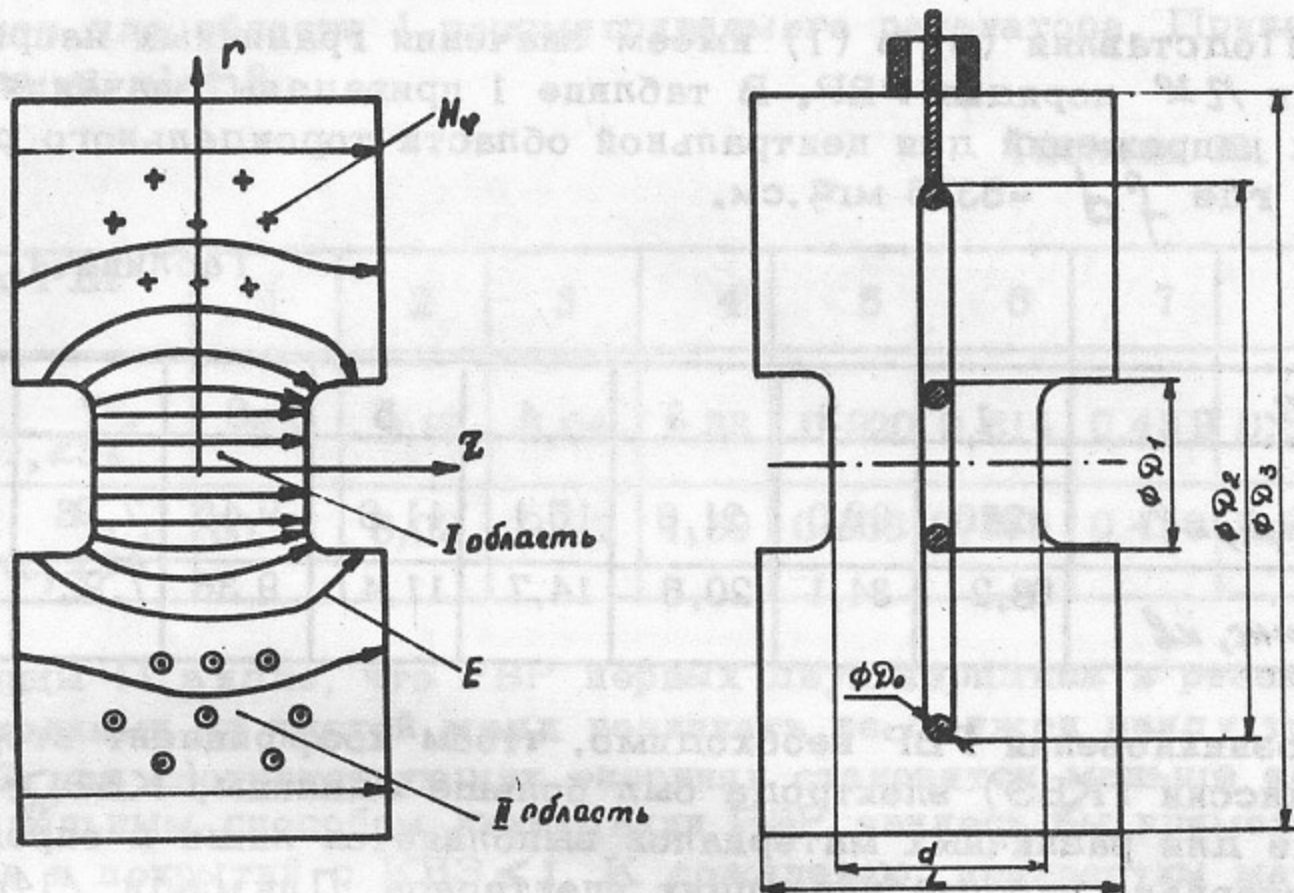
В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с развитием РВР в тороидальном резонаторе с $f d = 5375$ мгц.см на частоте 430 мгц. Этот резонатор является уменьшенным макетом одного из вариантов ускоряющей системы для электрон-позитронных накопителей ВЭПП-3 /12/ и ВЭПП-4.

Оценка границ зон существования РВР и методов его подавления

Тороидальный резонатор, возбуждаемый на основном типе колебания E_{010} , можно условно разделить на две области (рис. 1а). Между выступами (область I) ВЧ электрическое поле имеет значительную аксиальную (E_z) составляющую, которая слабо изменяется по радиусу. В области II ВЧ электрическое поле неоднородно и спадает по радиусу. Расчёт напряжений возникновения РВР затруднён, необходимо учитывать влияние ВЧ магнитного поля.

Для оценки границ зон существования РВР в области I воспользуемся данными работы /2/, полученными для случая плоского конденсатора:

$$U_n = \frac{V}{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} (2n-1)\pi \cos \varphi + 2 \sin \varphi}, \quad (1)$$



а)

б)

Рис.1. Тороидальный резонатор - распределение электромагнитного поля и основные размеры.

$$\begin{aligned}
 d &= 12,5 \text{ см} & D_1 &= 10,7 \text{ см} & D_3 &= 46,5 \text{ см} \\
 L &= 22,1 \text{ см} & D_2 &= 3,5 \text{ см} \\
 r_0 &= 2,0 \text{ см} & D_0 &= 1,5 \text{ см}
 \end{aligned}$$

Анализ условий устойчивости при двух одновременно меняющихся параметрах: фазы влета φ_1 , и начальной скорости влета позволил получить выражение для граничных фаз в ином виде /13/:

$$-\arctg \frac{2}{\pi} \frac{\kappa+1}{(2n-1)(\kappa-1)} \leq \varphi_1 \leq \arctg \frac{2}{\pi} \frac{\kappa-1}{(2n-1)(\kappa+1)} \quad (3)$$

для $K=3$ и $n=1$ значения фаз влета, полученные из уравнения (3), $-52^\circ \leq \varphi_1 \leq 18^\circ$, лучше совпадают с экспериментальными данными /1/.

Подставляя (3) в (1) имеем значения граничных напряжений для n -го порядка РВР. В таблице 1 приведены значения граничных напряжений для центральной области тороидального резонатора где $f d = 5375$ мкд.см.

Таблица 1.

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{верх}}, \text{кв}$	280	39,0	21,6	15,1	11,6	9,45	7,98	6,94
$U_{\text{ниж}}, \text{кв}$	88,2	34,1	20,6	14,7	11,4	9,36	7,92	6,86

Для возникновения РВР необходимо, чтобы коэффициент вторичной эмиссии (КВЭ) электрода был больше единицы, ($\text{КВЭ} > 1$). Это условие для различных материалов выполняется лишь в определенном интервале энергий падающих электронов. Для меди /14/ $\text{КВЭ} > 1$ при $W_p = 0,03 \rightarrow 2,25$ кэв. Так как КВЭ сильно зависит от состояния поверхности (обработки, загрязнений, режима обезгаживания), то этот диапазон может расширяться. Интегрируя уравнение движения электрона в электрическом ВЧ поле (область 1) имеем значение конечной скорости /1/

$$v_k = \frac{k}{k-1} \left(\frac{2eU_n}{m\omega d} \right) \cos \varphi_1 \quad (4)$$

Подставляя значения напряжения из уравнения (1) в (4) энергию электрона при падении на поверхность противоположной стенки можно записать в виде

$$W_{[\text{эв}]} = \frac{2k^2}{(k-1)^2} \frac{m\omega^2 d^2}{\left[\left(\frac{k+1}{k-1} \right) (2n-1)\pi + 2 \operatorname{tg} \varphi_1 \right]^2} \quad (5)$$

Используя уравнения (3) и (5) можно рассчитать диапазон энергий для каждого порядка РВР.

В таблице II приведены границы диапазонов энергий падения электронов для области 1 рассматриваемого резонатора. Принято $K = 3$ для $n = 1 + 8$.

Таблица II.

Порядок РВР	1	2	3	4	5	6	7	8
$W_{\text{верх}}, \text{кэВ}$	208	8,98	3,04	1,53	0,920	0,614	0,439	0,329
$W_{\text{ниж}}, \text{кэВ}$	60,8	8,02	2,93	1,50	0,908	0,609	0,436	0,328

Из таблицы II видно, что РВР первых двух порядков в резонаторе со стенками из чистой меди возникать не должен ввиду того, что КВЭ, при соответствующих энергиях становится меньше единицы. Радиальным способом ликвидации РВР явилось бы применение металлов и покрытий с КВЭ < 1 . К сожалению, неизвестны материалы, удовлетворяющие этому условию и применимые в резонансных системах с малыми потерями. Прохождение РВР путем питания резонатора импульсами с крутым фронтом не рассматривалось, так как в ускоряющих системах для накопителей /12/ типа ВЭПП-3 и ВЭПП-4 требуется плавная регулировка напряжения в широком диапазоне.

Одним из эффективных способов устранения РВР в резонаторах является подача постоянного напряжения смещения на один из электродов. Постоянное смещение изменяет время пролета электрона в зазоре и при определенном напряжении приводит к срыву разряда /3,4/. Высокооборотный тороидальный резонатор с гальванически разделенными стенками конструктивно сложен. Поэтому в рассматриваемой конструкции для подачи смещения применен промежуточный электрод, расположенный в плоскости симметрии. Исследовались два варианта электродов - в виде одного и двух концентрических колец, подвешенных на металлическом штоке (рис.16). Такие промежуточные электроды вносят малые потери и незначительно снижают резонансное сопротивление. Однако они могут существенно ослабить электрическую прочность резонатора, если их разместить в

области максимума ВЧ поля. На рис.2 приведено расположение эквипотенциалей, полученных в наклонной электролитической ванне при подаче постоянного смещения на двухкольцевую систему.

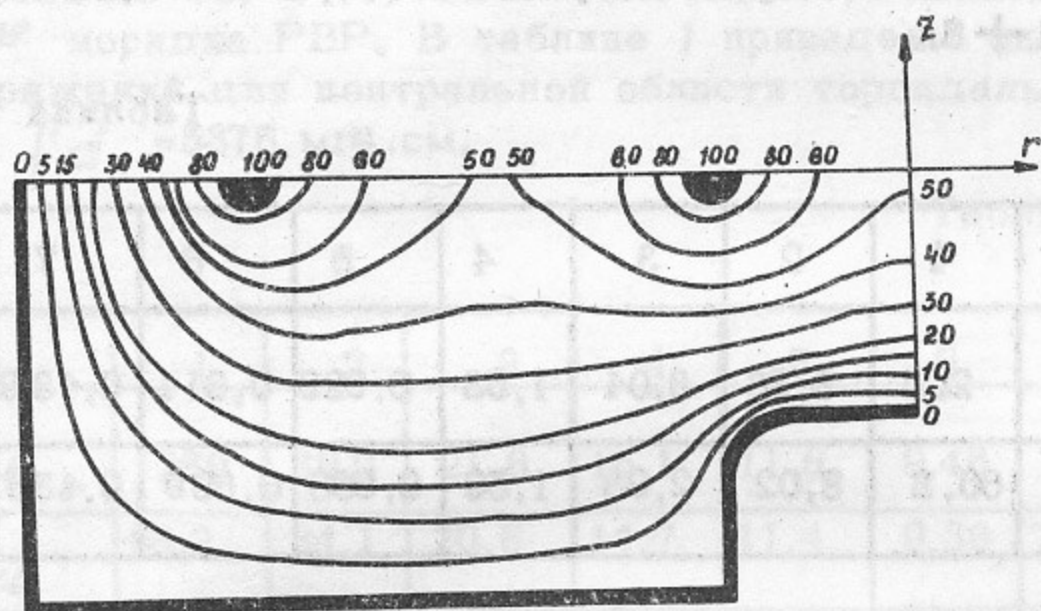


Рис.2. Расположение эквипотенциалей, полученное в электролитической ванне, при смещении на кольцах.

Из рис.2 видно, что на оси Z наибольшее значение потенциала равно примерно половине полного напряжения смещения, приложенного к кольцу. При наличии только одного большого кольца потенциал оси Z будет еще ниже. По данным работы /3/ для срыва двухэлектродного РВР на один из электродов необходимо подать смещение $U_{см} = 0,05V$. (6)

В рассматриваемом случае

при $d_1 = d/2, f = 430 \text{ мГц}$ $V_{[в.см]} = 2,24 \cdot 10^{-2} (fd_1)^2 (\text{мГц} \cdot \text{см}^2)$

$U_{\text{кольца}} = 2U_{см} = 16 \text{ кв.}$

Таким образом, удаление кольца от области максимального электрического поля приведет к необходимости подачи смещения составляющего заметную долю рабочего ВЧ напряжения, что конструктивно сложно.

Следует ожидать зависимости зон РВР от знака поданного на кольцо смещения. При небольшом отрицательном смещении за счёт радиальной компоненты электрического поля возможна допол-

нительная фокусировка электронов к центру (эффект электростатической линзы) и усиление разряда.

При подаче положительного смещения на кольце может возникнуть при определенных условиях одноэлектродный РВР¹³. Кроме того, положительное смещение на кольце образует вблизи его потенциальную яму, с зависимостью потенциала от радиуса близкой к логарифмической. В работе /7/ подробно анализируется движение частицы в таком поле. В рассматриваемом нами случае частота вращения электрона при напряжении смещения превышающем +4,8кв может оказаться равной резонансной.

Действительно, для электрона вращающегося в поле цилиндрического конденсатора можно записать:

$$m(2\pi f)^2 r = \frac{e U_k}{r \ln R_1/r_1} \quad (7)$$

где f — частота вращения электрона,

r — радиус орбиты,

U_k — напряжение между электродами конденсатора,

R_1 и r_1 — соответственно наружный и внутренний радиусы коаксиальных электродов.

Перепишем (7) в виде

$$U_k = \frac{m}{e} (2\pi f r)^2 \ln \frac{R_1}{r_1}$$

Принимая для одиночного кольца, что R_1 равно расстоянию до ближайшей стенки резонатора, а частота вращения равна частоте ВЧ поля, можно определить пороговое напряжение на кольце U_k , при котором возникнет вращение. $R_1 = 6$ см, $r = r_1 = 0,75$ см, $f = 430$ мГц, $U_k = 4,78$ кв. Вращаясь вокруг кольца электроны могут ионизировать остаточный газ и вызывать подгрузку резонатора.

Проведенное выше рассмотрение условий возникновения РВР в тороидальном резонаторе носит качественный характер. Оно позволяет понять явление и сделать оценочные расчеты для центральной области резонатора, где электрическое поле относительно однородно.

Для выяснения реальной картины возникновения РВР проведен эксперимент на модели.

Аппаратура и методика измерений

Экспериментальное исследование РВР проводилось в специально сконструированном тороидальном резонаторе, изготовленном из меди с геометрией и размерами, указанными на рис. 1, подобными одному из вариантов резонатора ВЭПП-3. В плоскости симметрии на изоляторе подвешено кольцо, на которое от выпрямителя через балластное сопротивление подается смещение с плавной регулировкой от -20 до $+20$ кв. Резонатор помещен в объем из нержавеющей стали откачиваемый до 10^{-3} тор насосом ВН-2 МГ с азотной ловушкой, а окончательно магниторазрядным насосом НЭМ-100 до $(1 \div 5) \cdot 10^{-6}$ тор. Все вакуумные уплотнения выполнены из индия и отожженной меди. Резонатор непрогреваемый. Перед закрытием объема внутренняя поверхность обезжиривалась и окончательно протиралась спиртом. Вакуум в объеме контролировался по току магниторазрядного насоса.

Параметры резонатора — центральный зазор $d = 12,5$ см, рабочая частота $f = 430$ мц, собственная добротность $Q_0 = 20 \cdot 10^3$, шунтовое сопротивление на оси $R_{oe} = 3,4 \cdot 10^6$ ом.

Блок-схема установки для испытаний показана на рис. 3.

ВЧ мощность по кабелю поступает на резонатор с каскадно-го усилителя мощности (3) собранного на лампах ГС-39Б. Частота меняется перестройкой задающего генератора (1), работающего в непрерывном режиме. Выходная мощность грубо регулируется изменением анодного напряжения, поступающего с модулятора (4), и плавно при помощи аттенюатора (2). Усилитель мощности в импульсном режиме дает прямоугольный импульс длительностью $\tau = 150$ мксек, частота повторения $2,5$ гц, импульсная мощность 10 квт. Это позволяет получить напряжение на резонаторе до 250 кв. Согласование резонатора с кабелем осуществляется двумя шлейфами (7) и через направленный ответвитель (6) контролируются падающая и отраженная волна. При настройке в резонанс измерялась прошедшая в резонатор мощность, как разность мощностей падающей и отраженной волн, и по формуле

$$U = \sqrt{2(P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}}) R_{oe}} \quad (9)$$

определялось напряжение на зазоре резонатора. На основе этого калибровалась измерительная петля с детектором. Характеристика детектора предварительно снималась (в диапазоне измеряемых нап-

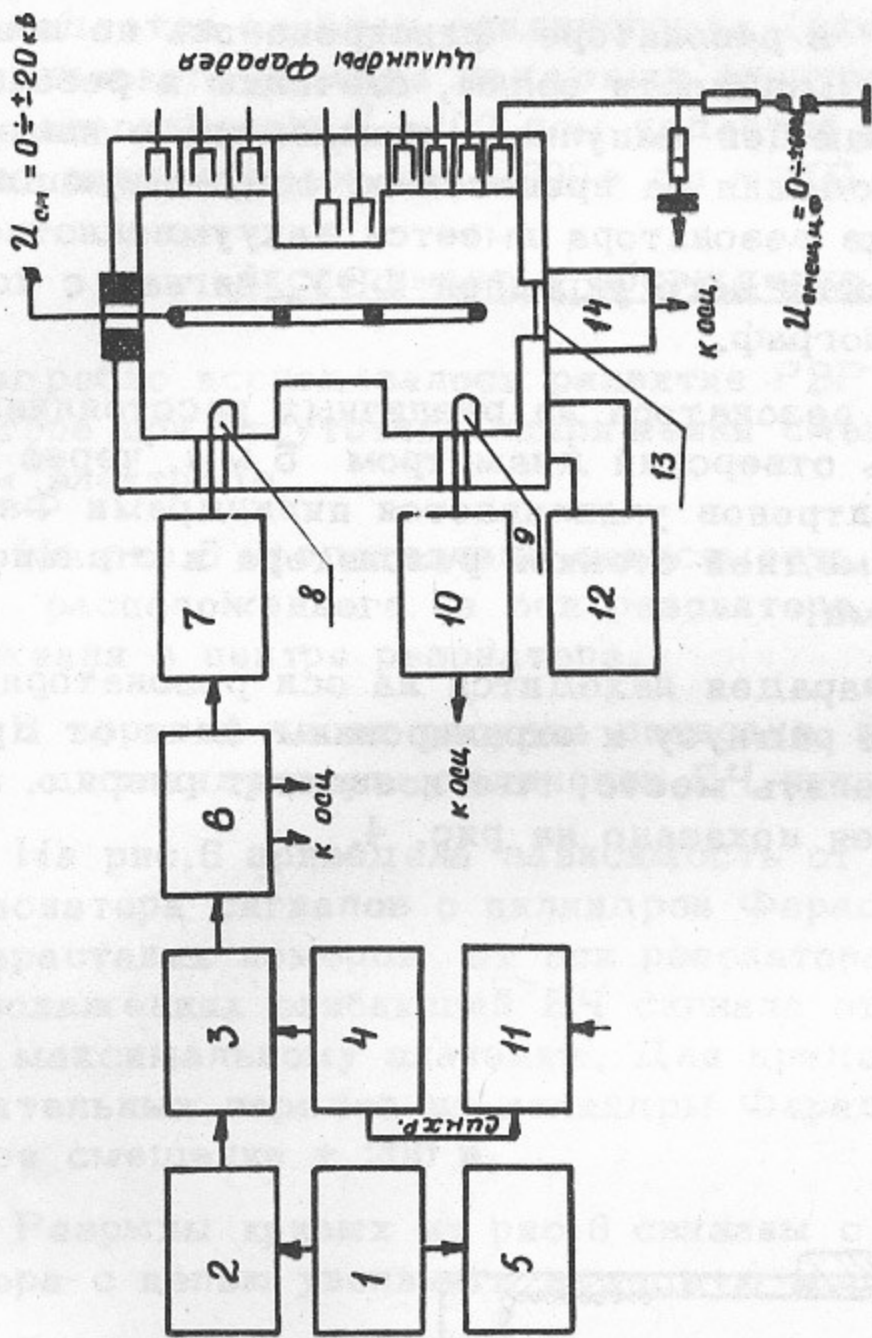


Рис. 3. Блок-схема установки для исследования РВР в резонаторе.

- 1- задающий генератор; 2- аттенюатор; 3- усилитель; 4- модулятор;
- 5- частотомер; 6- направленный ответвитель; 7- согласующий элемент;
- 8- ввод мощности; 9- измерительная петля; 10- детекторная головка;
- 11- осциллограф; 12- откачной агрегат; 13- вакуумно-плотное окно,
- 14- ФЭУ.

ряжений. Для предотвращения РВР во вводе мощности, петля ввода отделена от внутренней полости стеклянным колпаком и находится в атмосфере.

Возникновение РВР в резонаторе фиксировалось по появлению отраженной от ввода мощности волны, свечению в резонаторе и искажению формы огибающей импульса, снимаемого с измерительной петли. Для наблюдения за процессами, сопутствующими разряду, в боковой стенке резонатора имеется вакуумноплотное окно из плексигласа. Против него укреплен ФЭУ, сигнал с которого поступает на осциллограф.

В торцевой стенке резонатора на различных расстояниях от оси проделано девять отверстий диаметром 5 мм, через которые часть падающих электронов улавливается цилиндрами Фарадея, расположенными между медной стенкой резонатора и стальной стенкой вакуумного объема.

Первый цилиндр Фарадея находится на оси резонатора, остальные распределены по радиусу и экранированы один от другого. Это позволяет определить место, где возникает разряд. Устройство цилиндра Фарадея показано на рис. 4.

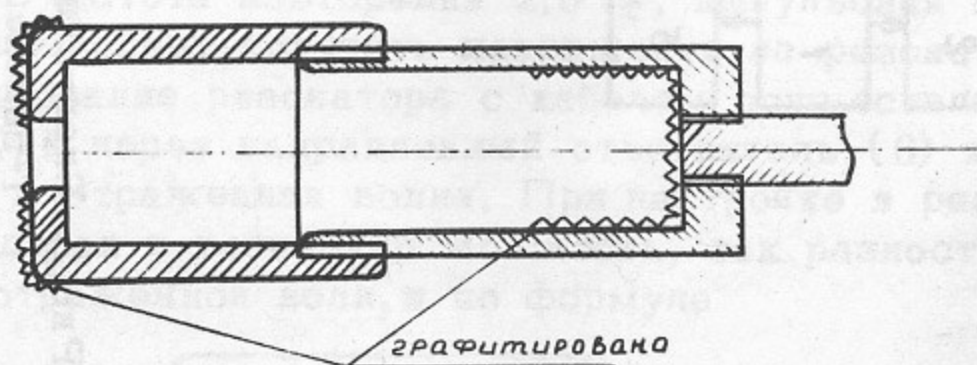


Рис.4. Цилиндр Фарадея

Для уменьшения вторичной эмиссии внутренняя поверхность цилиндров и внешняя торцевая поверхность около входного отверстия покрыты слоем графита. Попавшие в цилиндр Фарадея электроны создают импульс тока, который через разделительную емкость подается на вход осциллографа (рис.3). Для исследования энергетического спектра падающих электронов на цилиндр через сопротивление $R = 100$ ком подается постоянное смещение, плавно регулируемое от $+ 600$ в до $- 600$ в.

Эксперимент и обсуждение результатов

А) Подробно исследовалось развитие РВР в тороидальном резонаторе при отсутствии напряжения смещения на промежуточном электроде.

На рис.5 представлена зависимость сигнала с цилиндра Фарадея, расположенного на оси резонатора и сигнала с ФЭУ от ВЧ напряжения в центре резонатора.

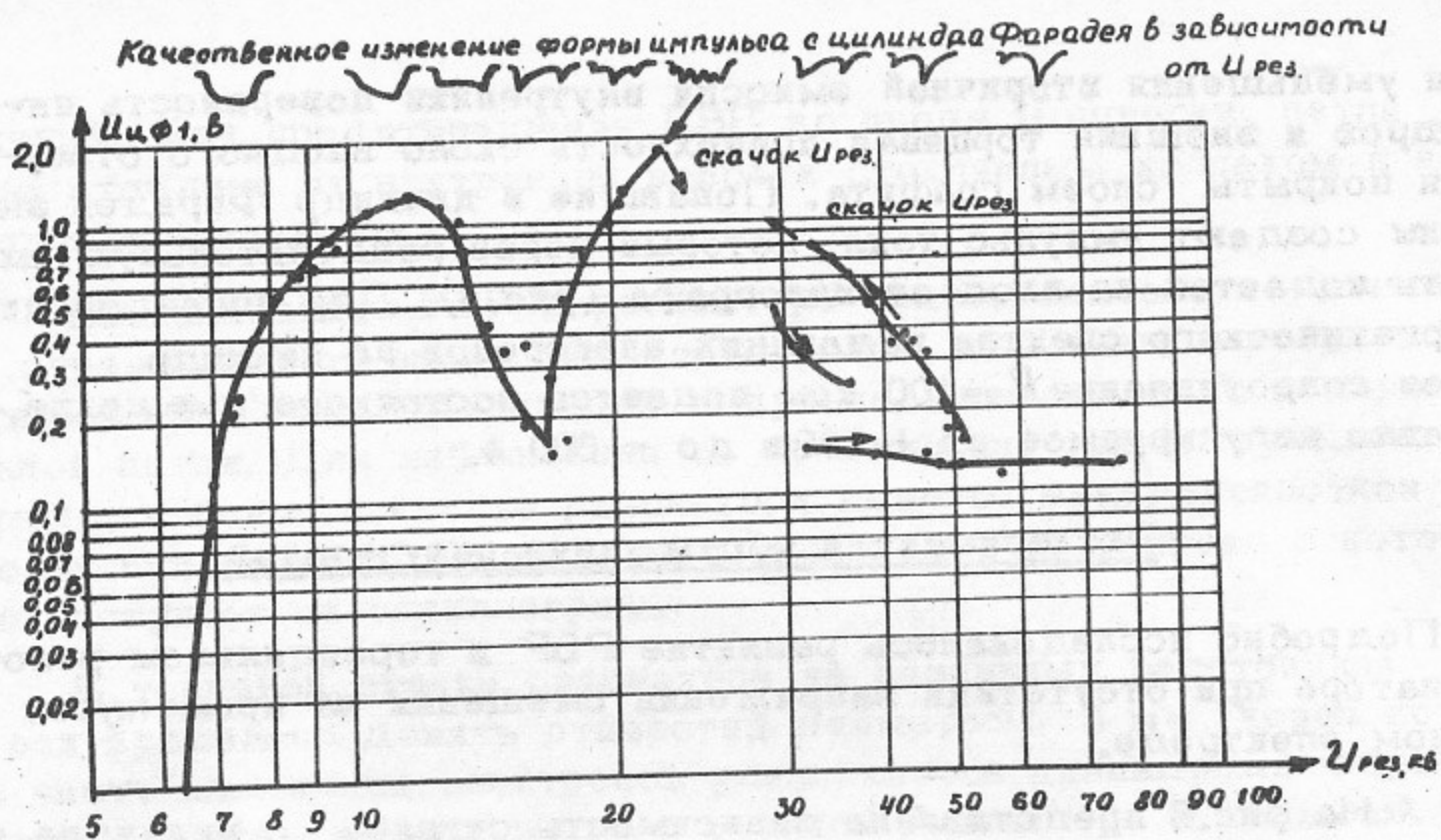
В верхней части рисунка показано, как менялась форма импульса с цилиндра при увеличении ВЧ напряжения.

На рис.6 приведена зависимость от ВЧ напряжения в центре резонатора сигналов с цилиндров Фарадея, удаленных в порядке возрастания номеров от оси резонатора. При искажениях огибающей ВЧ сигнала отсчет напряжения брался по максимальному значению. Для предотвращения накопления отрицательных зарядов на цилиндры Фарадея подавалось положительное смещение $+ 200$ в.

Разрывы кривых на рис.6 связаны с перестройкой режима генератора с целью увеличить выходную мощность.

В двух характерных точках снят энергетический спектр падающих электронов: на центральном цилиндре (№ 1) в районе первого пика (кривая рис.5) и на самом удаленном от оси цилиндре (№ 9) при больших напряжениях ВЧ на оси резонатора. Этот спектр характеризуется приведенной на рис.7 и 8 зависимостью сигнала с указанных цилиндров Фарадея от изменения напряжения смещения на них при фиксированном уровне ВЧ сигнала.

Из графиков рис.5 и 6 видно, что первоначально РВР в резонаторе возникает в области центральных выступов. Можно выделить две зоны по напряжению $8 \div 12$ кв и $21 \div 32$ кв, в которых



сигнала

Рис. 5. Зависимость с цилиндра Фарадея расположенного на оси резонатора (№ 1) от амплитуды напряжения на оси резонатора.

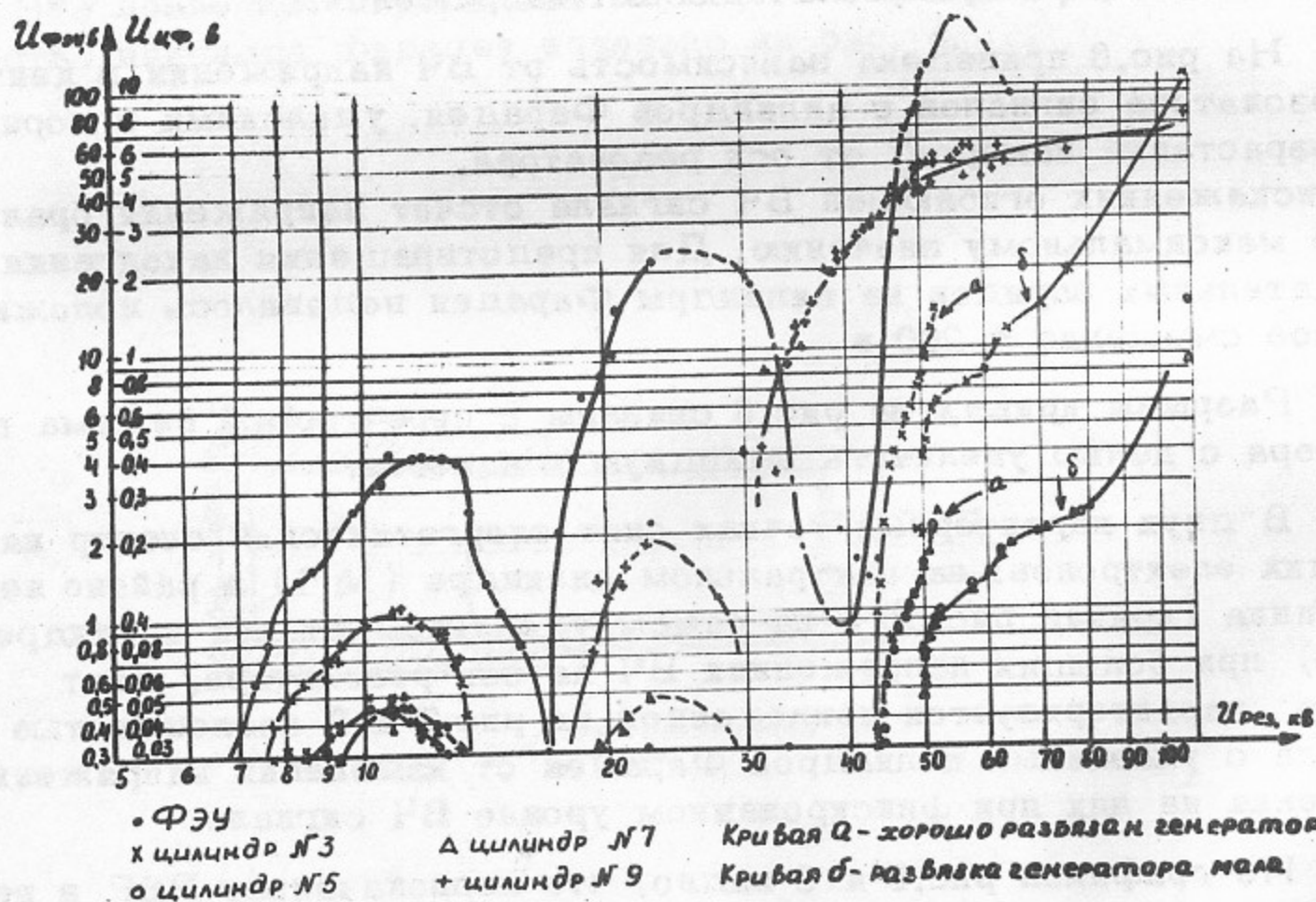


Рис. 6. Зависимость сигнала с 3, 5, 7 и 9 цилиндров Фарадея и сигнала с ФЭУ от амплитуды напряжения ВЧ на оси резонатора (номера цилиндров возрастают от оси резонатора).

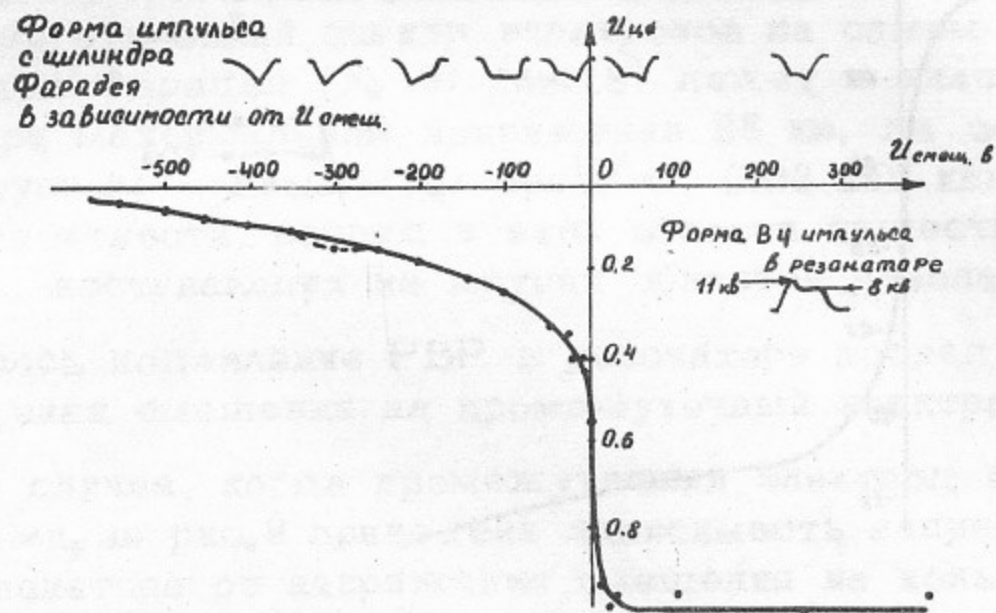


Рис.7. Зависимость сигнала и формы импульса на центральном цилиндре Фарадея от смещения на нём при неизменной мощности ВЧ импульса.

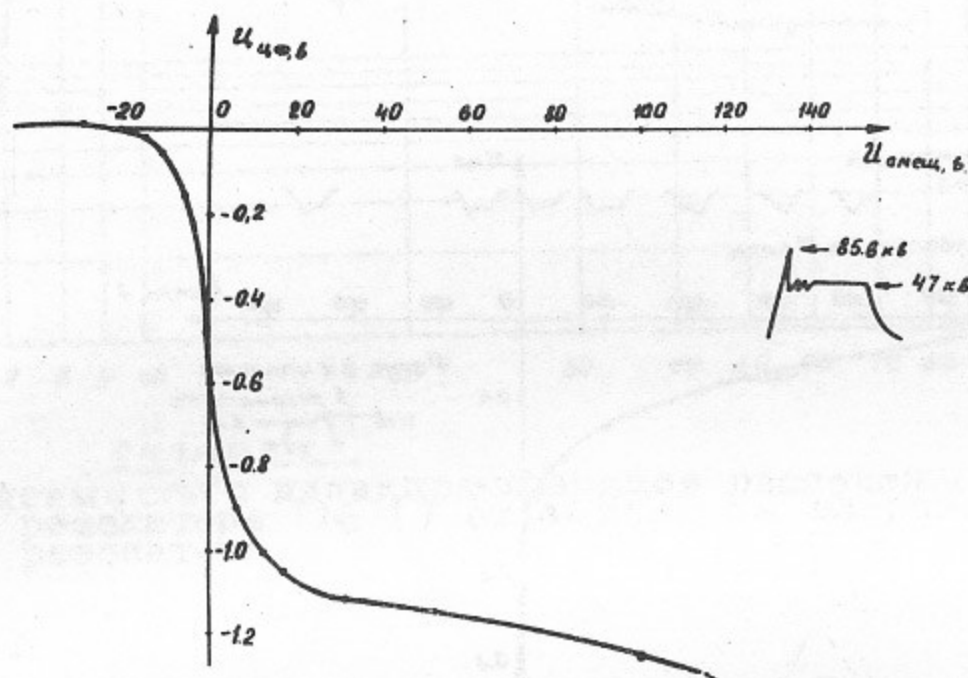


Рис.8. Зависимость амплитуды сигнала на самом удаленном от оси цилиндра Фарадея (№ 9) от смещения на нём при неизменном ВЧ импульсе.

наблюдалось резкое возрастание тока на цилиндре № 1.

В первой зоне свет, фиксируемый ФЭУ, мал; форма огибающей ВЧ импульса искажена слабо. Во второй зоне при $U_{рез} \approx 2$ кВ наблюдались характерные для РВР релаксационные колебания на огибающей ВЧ импульса, и при дальнейшем увеличении подводимой мощности отмечено возрастание света, ухудшение вакуума и срыв колебаний в резонаторе. Измеренные величины ВЧ напряжений при этом соответствуют зонам существования высших порядков РВР с числом $n = 3, 4, 5, 6, 7$ (см. таблицу 1).

Кривая рис.7 показывает, что в первой зоне при $U_{рез} = 8-11$ кВ энергетический спектр падающих электронов лежит в области от 0 до 0,6 кэВ. Это вполне согласуется с данными для высших поряд-

ков РВР, полученных из теории (см. таблицу II) если учесть, что КВЭ загрязненной меди может быть существенно больше единицы в указанном интервале энергий падающих электронов.

При дальнейшем увеличении вводимой в резонатор мощности огибающая ВЧ сигнала остается искаженной. Максимальное напряжение достигается на переднем фронте импульса, а разряд смещается в область большего радиуса, о чем свидетельствует возрастание сигнала на цилиндре № 3 (рис.6).

Напряжение на оси резонатора ограничивается величиной 50 кв. Энергетический спектр электронов на самом удаленном от оси цилиндре Фарадея (№ 9) (рис.8) лежит в диапазоне до 0,02 кэв при максимальном напряжении 85 кв, на оси резонатора. По литературным данным /14/ при $W < 0,03$ кэв квэ < 1 . Поэтому по всей вероятности, разряд в этой области существует за счет электронов, поступающих из других областей резонатора.

Б) Изучалось подавление РВР в резонаторе посредством подачи напряжения смещения на промежуточный электрод (рис.3).

Для случая, когда промежуточный электрод выполнен в виде 2-х колец, на рис.9 приведена зависимость напряжения ВЧ на зазоре резонатора от напряжения смещения на кольцах. Измерения проводились следующим образом: при заданном напряжении смещения увеличивался уровень ВЧ мощности до появления сигнала с ФЭУ, в два раза превышающего уровень его собственных шумов (рис.9, кривая "а"). При этом ток за счет РВР мал и еще не наблюдалось заметной подгрузки резонатора разрядом.

При увеличении вводимой ВЧ мощности, при большем напряжении на зазоре, появлялось ^{заметное} отражение от ввода мощности.

Кривая "б" рис.9 получена, когда напряжение отраженной волны составляло 1/10 напряжения падающей. При этом свет с ФЭУ увеличивался примерно в 100 раз по сравнению с предыдущим измерением (а) и на огибающей ВЧ импульса наблюдались релаксационные колебания. Из кривых рис.9 видно, что знак смещения по разному влияет на РВР в резонаторе. При отрицательном смещении в интервале 0 ÷ 5 кв разряд возникает при меньших ВЧ напряжениях.

Внутреннее кольцо, по-видимому, образует электростатическую линзу, которая не позволяет электронам, участвующим в разряде, уходить из зазора. При смещении от -5 до -12 кв порог возникновения РВР смещается в сторону больших ВЧ напряжений,

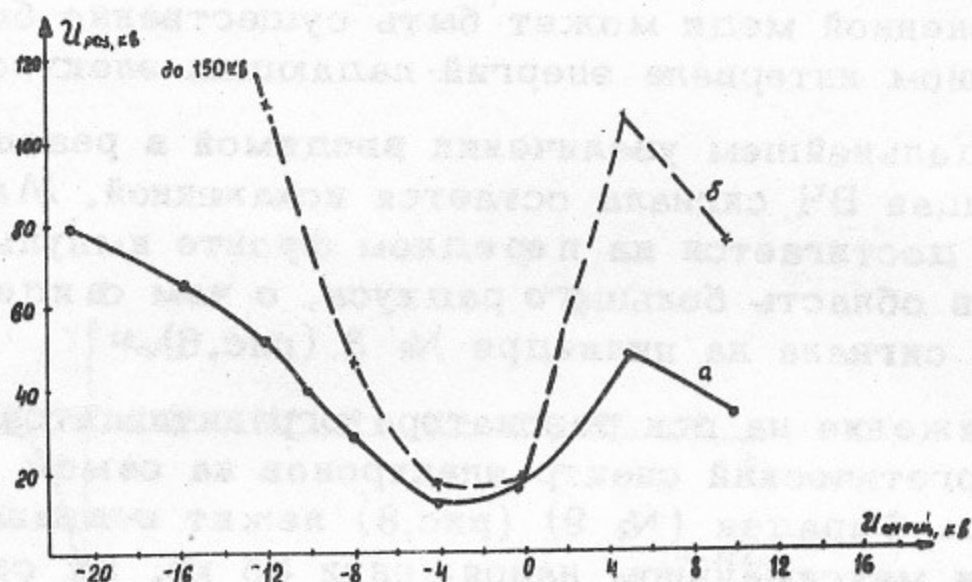


Рис.9. Зависимость напряжения в центре резонатора от напряжения смещения на промежуточном электроде (два кольца):

- а) при появлении свечения в объеме,
 б) при достижении $U_{сдв} = 0,1 U_{наг}$.

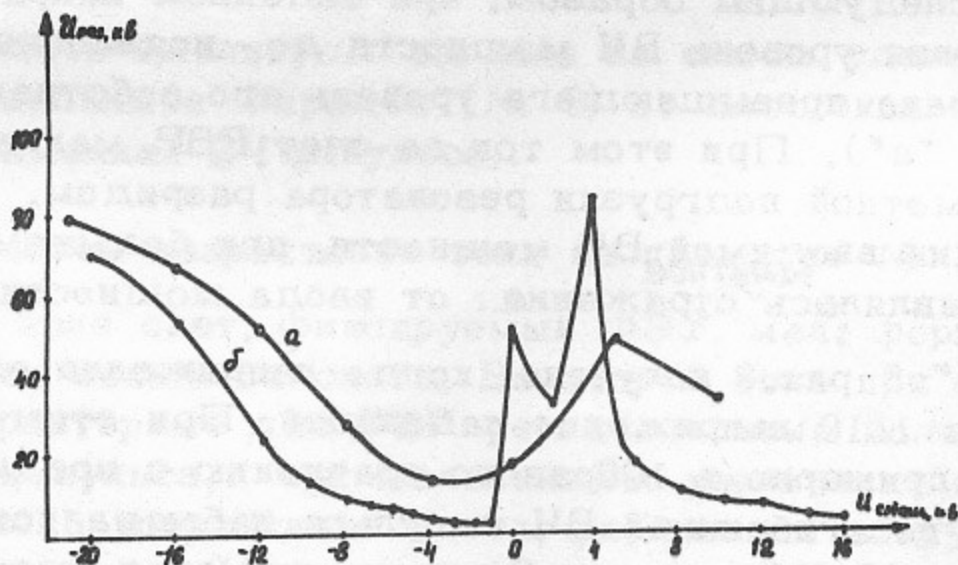


Рис.10. Зависимость напряжения в центре резонатора от напряжения смещения на промежуточном электроде при появлении свечения в объеме:

- б) одно кольцо ϕD_2 , а) два кольца ϕD_1 и ϕD_2 (ср. рис.1).

а при $U_{см} = -16$ кВ и более удалось подняться до напряжения на оси резонатора 150 кВ (в данном случае напряжение было ограничено мощностью генератора) с ростом напряжения ВЧ интенсивность света росла, наблюдалось небольшое увеличение отраженной волны, но ограничения не было. Значение необходимого отрицательного смещения совпадает с данными оценочного расчета. При подаче положительного смещения +5 кВ РВР возникал при больших ВЧ напряжениях. Однако при дальнейшем увеличении положительного смещения от +5 до +20 кВ порог по напряжению ВЧ уменьшался. В этом диапазоне смещений наблюдалось несколько зон РВР, границы которых сильно зависели от продолжительности работы. Наличие этих зон можно объяснить существованием одноэлектродного разряда на кольцах.

На рис.10 (кривая "б") приведена та же зависимость напряжения в центре резонатора от смещения при появлении свечения для промежуточного электрода в виде одного большого кольца с диаметром D_2 . Условия измерений аналогичны предыдущему случаю (рис.9а). В этом варианте для подавления РВР требуется большее отрицательное смещение. Для сравнения на рис.10 нанесена кривая "а" рис.9. Отличие величины $U_{рез}$ при $U_{см} = 0$ связано, видимо, с большой чувствительностью порогов возникновения разряда к состоянию поверхности. Дело в том, что перед разборкой и удалением малого кольца были проведены опыты с тренировкой резонатора тлеющим разрядом. Это могло изменить состояние поверхности. При положительном смещении около +2 кВ наблюдается снижение напряжения, вызванное, по-видимому, одноэлектродным РВР на самом кольце.

Уменьшение порога возникновения разряда при смещении более +4 кВ может быть вызвано вращением электронов вокруг кольца в такт с ВЧ полем. На это указывает необычно долгое свечение в объеме, наблюдаемое с помощью ФЭУ. Например, при $U_{см} = +12$ кВ импульс света длился $\tau_{св} = 3$ мсек, тогда как длительность ВЧ импульса всего 150 мсек. Это объяснение качественно согласуется с оценкой порога начала вращения электронов вокруг кольца, полученной выше.

В целом можно сделать заключение, что при конструкции промежуточного электрода в виде двух колец следует подавлять РВР подачей отрицательного смещения, величина которого более 16 кВ. В конструкции с одним кольцом смещение должно быть соответственно увеличено.

В) Тренировка резонатора тлеющим разрядом. При длительной работе было замечено, что в процессе РВР происходила тренировка стенок резонатора, в результате этого разряда мог возникнуть лишь при повышенных ВЧ напряжениях, а в некоторых областях, где он наблюдался ранее, РВР пропадал. Однако, из-за ограничения величины тока РВР вакуумными условиями и возможностью пробоя при высоких уровнях ВЧ напряжения, такая тренировка, особенно в импульсном режиме, требует много времени и её эффект недостаточно устойчив. Известно [15], что для тренировки электродов большой площади и сложной формы с целью повышения пробивной прочности в вакууме применяется очистка тлеющим разрядом. Эффективность очистки определяется плотностью тока и энергией ионов и электронов. В настоящей работе выяснялось, как тренировка тлеющим разрядом влияет на РВР в резонаторе. Тренировка проходила по следующей методике.

После выключения магниторазрядного насоса вакуум в системе ухудшался до 10^{-3} тор за счет газовыделения из стенок и натекания. На промежуточный электрод подавалось увеличивающееся постоянное смещение, и при напряжении около - 10 кв загорался тлеющий разряд. Это приводило к уменьшению напряжения смещения. Ток разряда ограничивался бакластным сопротивлением выпрямителя смещения и регулировался изменением напряжения. В резонаторе наблюдалось характерное бледно-сиреневое свечение.

Для двухкольцевого промежуточного электрода типичный режим тренировки:

смещение = - 5,4 кв, разрядный ток - 10 ма,

вакуум в резонаторе 10^{-2} тор, время тренировки - 15 мин.

После окончания тренировки включался магниторазрядный насос и при достижении вакуума порядка 10^{-6} тор на резонатор подавалась ВЧ мощность. Без подачи смещения на промежуточный электрод напряжение на резонаторе плавно удалось поднять до 250 кв.

Дальнейшее увеличение напряжения ограничивалось имеющимся генератором. Величины токов со всех цилиндров Фарадея были ниже предела, обусловленного чувствительностью аппаратуры. После этого резонатор выдерживался 8 суток с выключенным насосом при вакууме порядка 10^{-2} - 10^{-3} тор. При повторной откачке до вакуума 10^{-6} тор и последующей подаче ВЧ мощности возникновения

РВР не наблюдалось. Сигналы с цилиндров Фарадея отсутствовали.

Перед вторым циклом испытаний резонатор был разобран, внутреннее малое кольцо вынуто и было проведено исследование подавления РВР при подаче смещения на одно кольцо. После сборки резонатора в нём наблюдался РВР. Затем была проведена тренировка тлеющим разрядом по прежней методике. Во время тренировки измерялись токи в цилиндрах Фарадея.

На рис.11 приведено распределение плотности тока по радиусу резонатора при тренировке тлеющим разрядом.

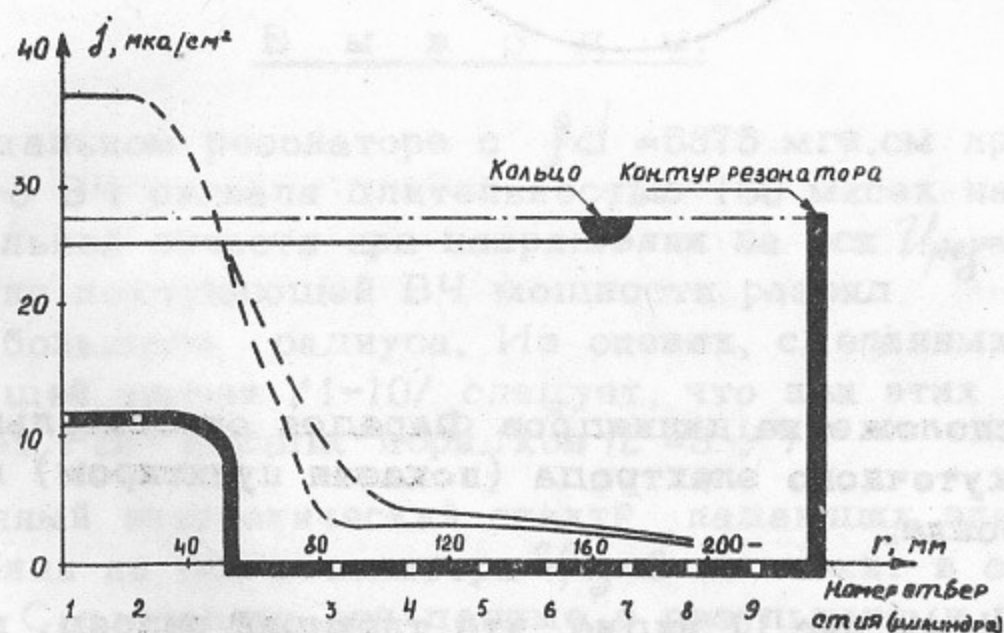


Рис.11. Распределение плотности тока по радиусу резонатора при тренировке тлеющим разрядом.

На рис.12 показано расположение цилиндров Фарадея на торцевой стенке резонатора. Кольцо, на которое подавалось смещение, обозначено пунктиром.

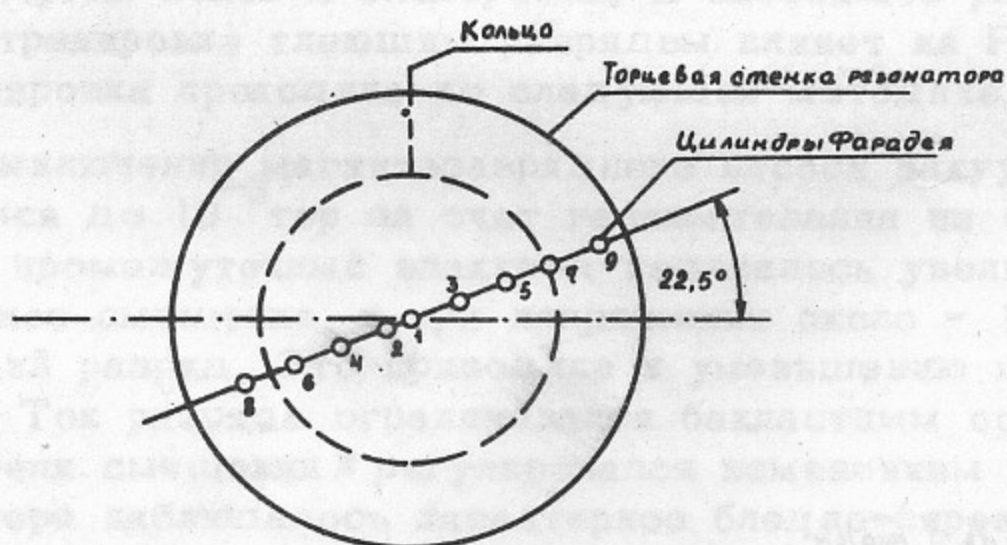


Рис.12. Расположение цилиндров Фарадея относительно промежуточного электрода (показан пунктиром) при тренировке.

Из графика рис.11 видно, что тлеющий разряд, как и ожидалось, развивается по наиболее длинному пути. Поэтому сильнее тренировалась поверхность вблизи центральной оси резонатора. Отличие кривых рис.11 объясняется тем, что отверстия с четными номерами расположены дальше от стержня подвески кольца по сравнению с нечетными отверстиями.

Приведенные данные позволяют оценить плотность тока и мощность выпрямителя, необходимые для тренировки тлеющим разрядом в других конструкциях.

Пропадание РВР может быть связано с тем, что обработанная тлеющим разрядом поверхность по эмиссионным свойствам приближения к чистой меди, для которой $KВЭ > 1$ при энергии падающих электронов $W_p = 0,2 \div 1,5$ кэв, а максимальная величина $KВЭ = 1,29$ при $W_p = 0,6$ кэв /11,16/.

Уменьшение $KВЭ$ по абсолютной величине, также сужение интервала энергий электронов, в котором $KВЭ > 1$, особенно важно в ВЧ устройствах с большим параметром fd .

Согласно уравнениям (3) и (5) РВР низших порядков с наиболее широкими зонами существования по напряжению и энергии падающих частиц при таком ограничении по $KВЭ$ не возникает. РВР более высоких порядков имеет узкие зоны и существенно большее время пролета.

При $KВЭ$ близком к единице и наличии небольших неоднородностей ВЧ поля может происходить нарушение фазовой устойчивости движения, в результате электроны рассеиваются и РВР высших порядков может не возникнуть.

В ы в о д ы:

- 1) В тороидальном резонаторе с $fd = 5375$ мкв.см при подаче импульсного ВЧ сигнала длительностью 150 мксек наблюдался РВР в центральной области при напряжении на оси $U_{рез} = 8 \div 40$ кв. При увеличении поступающей ВЧ мощности разряд смещается в сторону большего радиуса. Из оценок, сделанных на основе существующей теории [1-10] следует, что при этих напряжениях возникает РВР высших порядков $n = 3 \div 7$.
- 2) Измеренный энергетический спектр падающих электронов при напряжении на оси резонатора $U_{рез} = 8$ кв лежит в области от 0 до 0,6 кэв. Сопоставляя эти данные с результатами расчета (таблица II) можно предположить существование РВР высших порядков с $n = 6 \div 8$.
- 3) Для прохождения РВР без подгрузки резонатора на промежуточный электрод из двух колец необходимо подавать отрицательное напряжение, превышающее - 16 кв.

При подаче малого отрицательного смещения до -5 кв^д подгрузка резонатора за счет РВР усиливается, что может быть объяснено эффектом электростатической линзы.

При подаче положительного смещения наблюдалась подгрузка резонатора при $U_{см} \approx +2$ кв и $U_{см} > +5$ кв, что, возможно, связано с одноэлектродным разрядом и вращением электронов вокруг кольца.

- 4) Показано, что после тренировки поверхности тлеющим разрядом РВР не ограничивает подъем напряжения в резонаторе. Эффект тренированности сохраняется длительное время. Получено распределение плотности тренирующей поверхности тока.
- 5) Метод подавления РВР с помощью тлеющего разряда с электродов, удаленных от области максимального ВЧ поля в резонаторе может иметь принципиальное преимущество перед методом подачи смещения, так как в первом случае исключается ослабление электрической прочности резонатора.
- 6) Желательно провести более подробное исследование тренировки РВР тлеющим разрядом. В частности, выяснить влияние плотности тока, энергии частиц, газовой среды на степень тренированности поверхности, а также проверить эффект подавления РВР в более широком диапазоне ВЧ напряжений в непрерывном режиме.

В заключение авторы выражают благодарность Шехтману И.А. за просмотр рукописи и сделанные критические замечания, а также всем сотрудникам лаборатории, оказавшим помощь в проведении работы.

Л и т е р а т у р а

- 1) *A. Hatch, H. Williams, J. Appl. Phys., 25,*
p.417, (1954).
- 2) *A. Hatch, H. Williams, Phys. Rev., 112,*
p.681, (1958),
- 3) Б.А.Загер и В.Г.Тишин. ЖТФ, т.34, вып.2, p.297, (1964).
- 4) Б.И.Поляков, Б.Т.Зарубин и В.В.Кушин "ИТ РИАН", т. 1,
вып. 2 (1959).
- 5) *H. Gutton, Ann. Phys.,* 13, p.62, (1930).
- 6) Д.Г.Зайдин и А.В.Кушин ИТ РИАН, т.2, вып.4 (1960).
- 7) *R. H. Hooverman, J. Appl. Phys., 34,* p.3505 (1963).
- 8) *E. F. Vance, J. Appl. Phys., 34,* p. 3237 (1963).
- 9) *H. Tamagawa, E.T.J. of Japan, 3,* 2 p.42, (1957).
- 10) *H. Tamagawa, E.T.J. of Japan, 3,* 3, p.93 (1957).
- 11) Г.Брюининг. Физика и применение вторичной электронной эмиссии "Советское радио", Москва (1958).
- 12) В.Г.Вещеревич, Э.И.Горникер, Н.Н.Иощенко, М.М.Карлинер, В.М.Петров, В.В.Петухов, И.К.Седляров, М.Н.Таршиш, И.А.Шехтман. "Высокочастотная система электрон-позитронного накопительного кольца ВЭПП-3." Доклад на II Всесоюзном совещании по ускорителям зар. частиц, 1970г.
- 13) Шемелин В.Д. Дипломная работа "РВР и методы его подавления в ускоряющих системах накопителя ВЭПП-3", Новосибирск, (1970).
- 14) П.Л.Капица. Электроника больших мощностей, т.2, стр.150, изд. АН СССР, М., (1963).
- 15) И.Н.Сливков, В.И.Михайлов, Н.И.Сидоров, А.И.Настюха. Электрический пробой и разряд в вакууме, Атомиздат, М., 1966.
- 16) Н.С.Чечик, С.М.Файнштейн, Т.М.Лифшиц. Электронные умножители, ГИТТЛ, (1957).

Ответственный за выпуск С.Н.Родионов
Подписано к печати I/III.73г., МНО8076
Усл. 1,1 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.
Заказ № 9 . ПРЕПРИНТ.

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР, гв