

Отчет по лабораторной работе №1

Исследование отражательного клистрона

Работу выполнили студенты
440 группы радиофизического факультата
Сарафанов Ф.Г., Платонова М.В.

Нижний Новгород, 10 сентября – 24 сентября 2019 г.

Содержание

Введение	2
1. Отражательный клистрон	3
1.1. Резонатор клистрона	4
1.2. Модуляция скорости электронов в пучке	5
1.3. Модуляция электронного пучка по плотности	6
1.4. Возбуждение резонатора клистрона током пучка	8
2. Изучение работы клистрона	9
2.1. Выбор оптимального режима	9
2.2. Измерение ширины частотной перестройки	11
2.3. Мощностные характеристики клистрона	11
2.4. Частотные характеристики клистрона	12
2.5. Определение пускового тока клистрона	14
Заключение	14

Введение

В настоящей работе изучается отражательный клистрон – вакуумный СВЧ-генератор, генерация в котором осуществляется за счет преобразования кинетической энергии пучка электронов, ускоренных статическим электрическим полем, в энергию СВЧ-колебаний.

Для этого пучок электронов модулируется по плотности и проводится через резонатор клистрона, в котором переменный конвекционный ток пучка возбуждает колебания.

Модуляция плотности потока электронов осуществляется следующим образом: однородный электронный поток пропускается через переменное электрическое поле управляющего устройства (управляющее поле). Поток становится пространственно неоднородным: характер процесса группировки электронов, координата и время образования сгустка в клистронах определяются условиями движения вне управляющего промежутка.

Клистроны делятся на два типа: пролетные и отражательные. В пролетных группировка происходит при движении электронов в пространстве, свободном от внешних постоянных или переменных полей; группировка становится возможной за счет того, что «быстрые» электроны догоняют «медленные», вылетевшие из управляющего промежутка раньше «быстрых».

В отражательных клистронах электроны, вышедшие из группирующего устройства, движутся в постоянном тормозящем электрическом поле. Значение этого поля таково, что все электроны, вылетевшие из управляющего устройства, возвращаются назад. Группировка в отражательных клистронах происходит благодаря тому, что «быстрые» электроны находятся в пространстве группировки дольше «медленных», и на обратном пути оказывается возможной встреча «быстрых» электронов с медленными, вышедшими из управляющего промежутка позже «быстрых».

1. Отражательный клистрон

Принципиальная схема отражательного клистрона приведена на рис. 1. Здесь тороидальный резонатор выполняет роль и управляющего устройства (зазор в резонаторе), и устройства, накапливающего энергию электромагнитных колебаний.

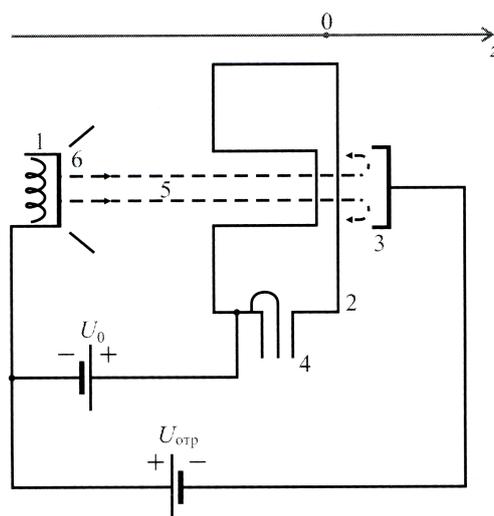


Рис. 1. Идеализированная принципиальная схема клистрона: 1 – катод, 2 – резонатор, 3 – отражатель, 4 – вывод энергии, 5 – электронный поток, 6 – управляющий электрод

Электронный поток, эмитируемый катодом, ускоряется в промежутке между катодом и резонатором, после чего первый раз попадает в зазор резонатора, образованный двумя прозрачными для потока металлическими сетками. В зазоре происходит модуляция электронного потока по скорости. После выхода из резонатора электроны движутся в тормозящем поле отражающего электрода, возвращаются назад и повторно проходят зазор. При соответствующем выборе потенциалов на электродах клистрона сгусток электронов формируется в сечении зазора резонатора в момент времени, когда высокочастотное поле в зазоре тормозит возвращающиеся электроны, при этом происходит преобразование кинетической энергии электронов в энергию колебаний резонатора. Существование стационарных колебаний в клистроне оказывается возможным при компенсации потерь в резонаторе и нагрузке за счет энергии модулированного электронного потока.

1.1. Резонатор клистрона

В целях эффективного обмена энергией между пучком электронов и полем в резонаторе при сохранении высокой добротности резонатор выполнен так, что пролетный участок (емкостной объем резонатора, заключенный между сетками) сделан достаточно тонким¹, а добротность обеспечивается большим размером индуктивного объема резонатора.

Размеры резонатора много меньше длины волны основной моды резонатора, и поэтому резонатор рассматривается как колебательный контур с сосредоточенными параметрами.

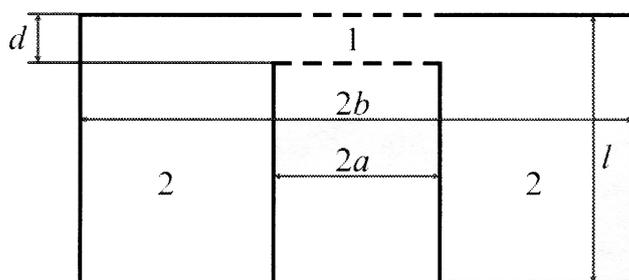


Рис. 2. Поперечное сечение тороидального резонатора: 1 – емкостной объем резонатора, 2 – индуктивный объем резонатора, $a, b \ll \frac{\lambda}{4}$, $l \ll \frac{\lambda}{4}$, $d \ll l$

Потери в резонаторе. Из-за конечной проводимости стенок и отвода мощности в нагрузку, свободные колебания резонатора являются затухающими, при этом в рамках метода комплексных амплитуд удобно вводить комплексную частоту $\omega = w' + iw''$.

Перестройка частоты резонатора. Индуктивная перестройка осуществляется введением в область магнитного поля металлических поршней, которые, уменьшая занятый полем объем, уменьшают индуктивность резонатора и тем самым повышают его резонансную частоту. Емкостная перестройка может быть осуществлена путем деформации гибкой мембраны. Сближение сеток резонатора, обеспечиваемое прогибом мембраны, ведет к увеличению емкости зазора и уменьшению резонансной частоты. Механические способы перестройки обеспечивают отстройку от основной частоты на 20-25%.

¹Время пролета электрона через резонатор $\tau = \frac{a}{v}$, период собственных колебаний в кубическом резонаторе $T = \frac{\sqrt{2}a}{c}$, на нерелятивистских скоростях выполняется $\tau \gg T$. Но для эффективного обмена энергией пролетный участок должен быть таким тонким, чтобы $\tau \sim T$.

1.2. Модуляция скорости электронов в пучке

Рассмотрим процесс модуляции электронного потока по скорости. В установившемся режиме колебания в резонаторе близки к гармоническим, поле в зазоре имеет вид $E = E_z = E_m \sin \omega t$, где $E_m = \frac{U_m}{d}$, U_m – амплитуда напряжения на зазоре, E_z – проекция электрического поля на ось z , d – ширина зазора, ω – частота стационарных колебаний.

Найдем приращение энергии электрона, прошедшего через зазор. Кинетическая энергия, приобретаемая одиночным электроном при прохождении пути dz внутри зазора, равна работе силы электрического поля:

$$dW = -e \frac{U_m}{d} \sin \omega t dz,$$

где e – модуль заряда электрона (знак заряда учтен в явном виде)². Электрон, прошедший расстояние между катодом и резонатором, имеет кинетическую энергию $\frac{mv_0^2}{2} = eU_0$, где $U_0 > 0$ – потенциал резонатора относительно катода, v_0 – скорость электрона, m – его масса. Отсюда при условии $v_0 \ll c$ имеем³

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}$$

При выполнении условия $\frac{U_m}{U_0} \ll 1$ возмущения скорости v_0 под воздействием высокочастотного поля незначительны. Поэтому если t_0 – время прохождения электроном центра зазора, то время его нахождения в точке с координатой z есть $t = t_0 + \frac{z}{v_0}$. Полное приращение энергии имеет вид

$$\Delta W = \int_{-d/2}^{+d/2} \frac{-eU_m}{d} \sin \left(\omega t_0 + \frac{\omega z}{v_0} \right) dz = -eU_m \sin \omega t_0 \frac{\sin(\theta_3/2)}{\theta_3/2} = -eMU_m \sin \omega t_0,$$

где $\theta_3 = \frac{\omega d}{v_0}$ – невозмущенный угол пролета электрона через модулирующий зазор, $M = \frac{\sin(\theta_3/2)}{\theta_3/2}$ – коэффициент взаимодействия электронного потока с полем зазора. Полная кинетическая энергия электрона, вошедшего в зазор с начальной скоростью на выходе из него может быть представлена в виде:

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + \Delta W = eU_0 + \Delta W.$$

²Если напряжение (потенциал второй сетки относительно первой) $U = -U_m \sin \omega t$ положительно, оно ускоряет электрон, движущийся в положительном направлении оси z .

³Пренебрежение релятивистскими поправками возможно до значений U_0 порядка нескольких десятков киловольт.

Таким образом, скорость электрона на выходе из зазора оказывается равной

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m}U_0} \left(1 - \frac{MU_m}{U_0} \sin \omega t_0\right)^{1/2}.$$

При выполнении условия $\frac{U_m}{U_0} \ll 1$ можно разложить выражение для v в ряд Тейлора и ограничиться двумя первыми членами ряда:

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m}U_0} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{MU_m}{U_0} \sin \omega t_0 + \dots\right) \approx v_0 - v_1 \sin \omega t_0,$$

где $v_1 = \frac{MU_m}{2U_0}v_0$. Из полученного выражения видно, что скорость электрона на выходе из зазора определяется фазой поля, существовавшей в момент прохождения им центра зазора. Наибольшая амплитуда скоростной модуляции v_1 достигается при стремлении коэффициента взаимодействия M к единице, что выполняется при стремлении θ_3 к нулю.

1.3. Модуляция электронного пучка по плотности

В пространстве между резонатором и отражателем электроны двигаются в статическом тормозящем поле. Уравнение движения имеет вид $mz'' - e \frac{U_0 - U_{\text{отр}}}{L}$ где $U_{\text{отр}} < 0$ – напряжение на отражателе, L – расстояние между резонатором и отражателем. Интегрируя первый раз уравнение движения и учитывая выражение для скорости v при выходе из зазора, имеем

$$z' = v - \frac{e}{m} \frac{U_0 - U_{\text{отр}}}{L} (t - t')$$

где t' – момент выхода электрона из зазора. Через t в дальнейшем будем обозначать момент, когда тот же электрон возвращается в плоскость второй сетки. Повторное интегрирование уравнения (5) дает

$$z = v(t - t') - \frac{e}{m} \frac{U_0 - U_{\text{отр}}}{L} \frac{(t - t')^2}{2} + \frac{d}{2}$$

Время пролета электрона в пространстве группировки можно найти из условия $z = d/2$ при $t = t''$, откуда следует, что $t'' - t' = 0$ и $\frac{e}{m} \frac{U_0 - U_{\text{отр}}}{L} \cdot \frac{(t'' - t')}{2v} = 1$. Первое решение ($t' = t''$) соответствует моменту вылета электрона из зазора, второе дает время его пролета в тормозящем поле:

$$t'' - t' = \frac{2m}{e} \frac{vL}{L_0 - U_{\text{отр}}}$$

При выполнении условия $U_m/U_0 \ll 1$ время пролета в зазоре определяется скоростью v_0 , поэтому связь времени вылета электрона из зазора со временем его нахождения в центре зазора можно приближенно записать в виде $t'' = t_0 + d/(2v_0)$. Таким образом, подставляя выражение для скорости (4) в (7), получим

$$t'' = t' + \frac{2mL}{e(U_0 - U_{\text{отр}})} \left(v_0 - \frac{MU_m}{2U_0} v_0 \sin \left(\omega t' - \frac{\omega d}{2v_0} \right) \right)$$

Из найденного выражения видно, что время пролета электронов в пространстве группировки зависит от фазы высокочастотного напряжения, существующего в момент пролета электроном середины зазора, и от амплитуды этого напряжения.

На рис.3 представлены примеры пространственно-временных диаграмм (зависимостей координат электронов от времени) для таких значений потенциалов на резонаторе и отражателе, при которых электроны, вышедшие из резонатора в различные моменты времени, возвращаются в него одновременно, образуя сгусток. Сверхвысокочастотное поле в резонаторе в рассматриваемых в случаях в момент времени пролета сгустка максимально и является для него тормозящим. Уменьшение кинетической энергии электронов при этом приводит к возрастанию энергии СВЧ поля. Разумеется, при других значениях потенциалов на электродах клистрона сгусток может сформироваться и вне зазора резонатора, при этом эффективная передача энергии от пучка полю становится невозможной.

Домножим соотношение (8) на v_0 и введем следующие величины:

$$\theta_r = \frac{2m}{e} \frac{v_0 \omega L}{U_0 - U_{\text{отр}}}$$

– угол пролета электрона в пространстве группировки,

$$X = \theta_r \frac{MU_m}{2U_0}$$

– параметр группировки. В результате получим выражение, связывающее время возвращения электрона в плоскость второй сетки (t'') со временем выхода электрона из зазора (t'):

$$\omega t'' = \omega t' + \theta_r - X \sin \left(\omega t' - \frac{\theta_3}{2} \right)$$

Соотношение (11) является исходным для нахождения конвекционного тока пучка электронов.

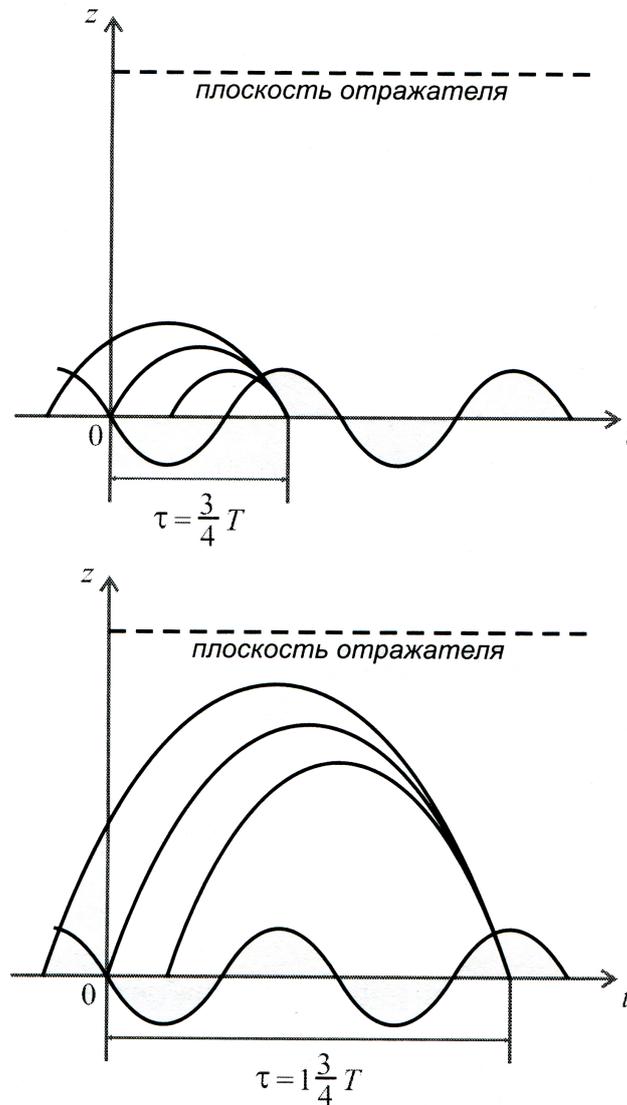


Рис. 3. Пространственно-временные диаграммы движения электронов при двух значениях оптимального времени пролета τ в пространстве группировки ($z = 0$ координата, соответствующая середине зазора)

1.4. Возбуждение резонатора клистрона током пучка

Сгруппированный электронный пучок формирует ток I , возбуждающий колебания в резонаторе. При этом условие возбуждения клистрона принимает следующий вид:

$$\pi + 2\pi n < (\theta_z + \theta_r) < 2\pi(n + 1)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$

Указанные интервалы углов пролета, при которых возможна генерация, носят название зон генерации клистрона. В центре зон генерации, т. е. при $\theta_r + \theta_z = 2\pi(n + 3/4)$ амплитуда максимальна, а на краях равна нулю. Угол пролета в пространстве группировки θ_r можно варьировать, изменяя либо напряжение на резонаторе, либо напряжение на отражателе (см. (9)). Пространственно-временные диаграммы, соответствующие двум оптимальным углам пролета, представлены на рис. 3.

Одной из важных характеристик клистрона является пусковой ток – значение тока I_0 , при котором клистрон возбуждается:

$$I_{0 \text{ пуск}} = -\frac{2U_0 G}{M^2 \theta_r \sin(\theta_z + \theta_r)}$$

где G – действительная часть проводимости резонатора.

Как видно из соотношения (13), пусковой ток клистрона тем меньше, чем меньше величина G . С ростом номера зоны самовозбуждение клистрона облегчается. Ток, требующийся для самовозбуждения клистрона, тем меньше, чем ниже ускоряющее напряжение U_0 . Легче всего клистрон возбуждается в центрах зон. Напротив, на их краях $\sin(\theta_z + \theta_r) \rightarrow 0$ и $I_{0 \text{ пуск}} \rightarrow \infty$.

2. Изучение работы клистрона

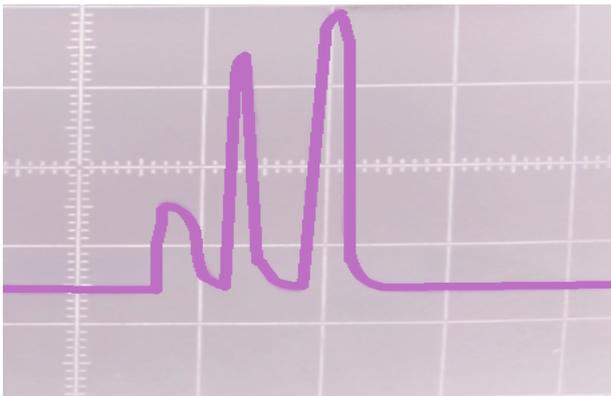
2.1. Выбор оптимального режима

После включения лабораторной установки был выставлен рабочий режим клистрона таким образом, чтобы на экране осциллографа наблюдать 3 зоны генерации, что было достигнуто при следующих значениях напряжения на резонаторе $U_{\text{рез}}$, на ускоряющем электроде $U_{\text{уск}}$ и на отражающем электроде $U_{\text{отр}}$:

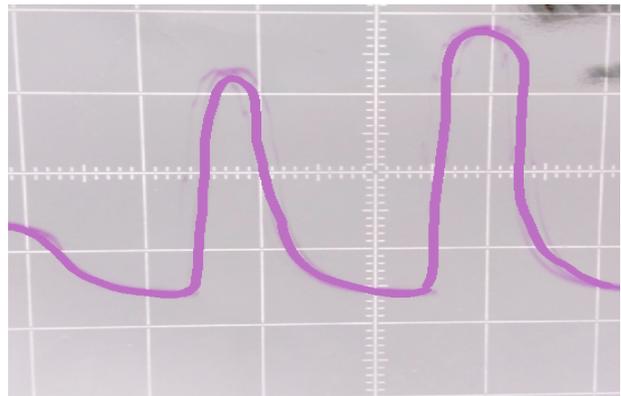
$$U_{\text{рез}} = 168 \text{ В}, \quad U_{\text{уск}} = 123 \text{ В}, \quad U_{\text{отр}} = -30 \text{ В}$$

При этом напряжения варьировались так, чтобы получить **оптимальный режим**, при котором реализуются максимальная мощность в центре зоны генерации и максимальная ширина зоны генерации.

Далее было рассмотрено поведение зон генерации при варьировании потенциалов электродов клистрона (см. рис. 4, рис. 5). Для этого варьировался потенциал на одном из электродов клистрона, а на других потенциал оставался фиксированным.

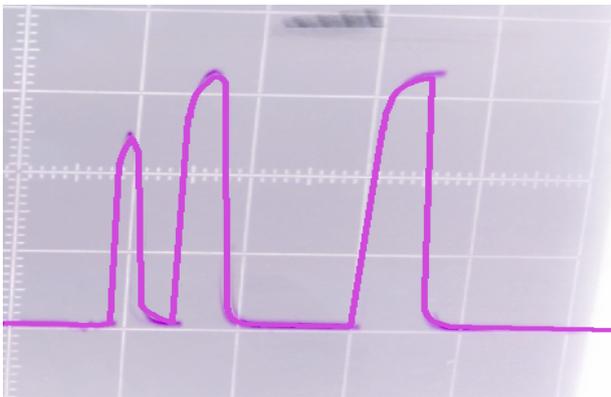


$U_{отр} = 60 \text{ В}$

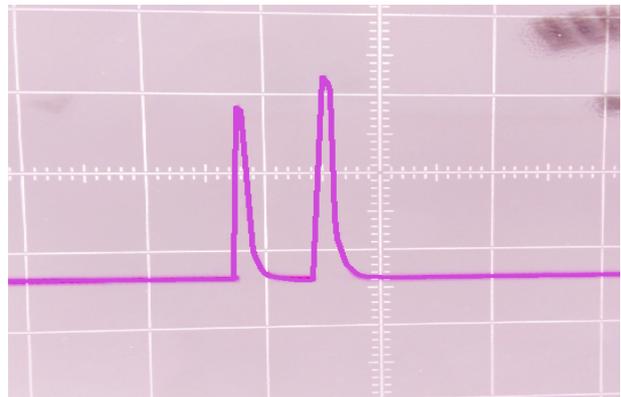


$U_{отр} = 120 \text{ В}$

Рис. 4. $U_{рез} = 168 \text{ В}$, $U_{уск} = 123 \text{ В}$



$U_{уск} = 156 \text{ В}$



$U_{уск} = 93 \text{ В}$

Рис. 5. $U_{рез} = 168 \text{ В}$, $U_{отр} = -30 \text{ В}$

2.2. Измерение ширины частотной перестройки

Уменьшая амплитуду пилообразного напряжения на отражателе клистрона, на экране была получена единственная зона генерации. Изменение резонансной частоты волномера отражается небольшим провалом в мощности генерации клистрона на этой частоте, что отражается появлением метки на экране осциллографа (см. рис. 6).

Зафиксировав показания волномера в крайних точках зоны, определена ширина частотной перестройки клистрона $\Delta\lambda$ вдоль зоны генерации:

$$\lambda_{\text{left}} = 10.6 \text{ см}, \quad \lambda_{\text{right}} = 10.56 \text{ см} \quad \Rightarrow \quad \Delta\lambda = 0.04 \text{ см}$$

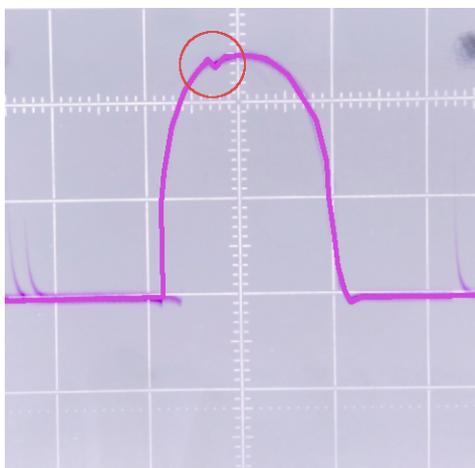


Рис. 6. Провал в мощности генерации (метка)

2.3. Мощностные характеристики клистрона

Измерение мощностных характеристик (тока детектора, который пропорционален мощности генерируемых клистроном колебаний) велось при отключенном осциллографе.

Были измерены зависимости тока детектора от напряжения на отражателе (см. рис. 7, стр. 12), а также от напряжения на резонаторе (см. рис. 8, стр. 12) при нескольких фиксированных напряжениях на резонаторе и отражателе соответственно.

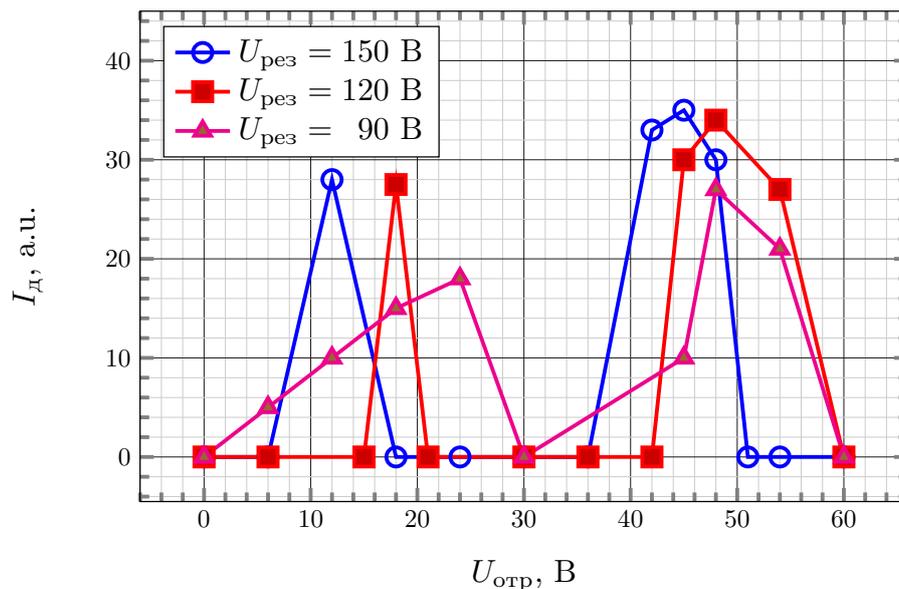


Рис. 7.

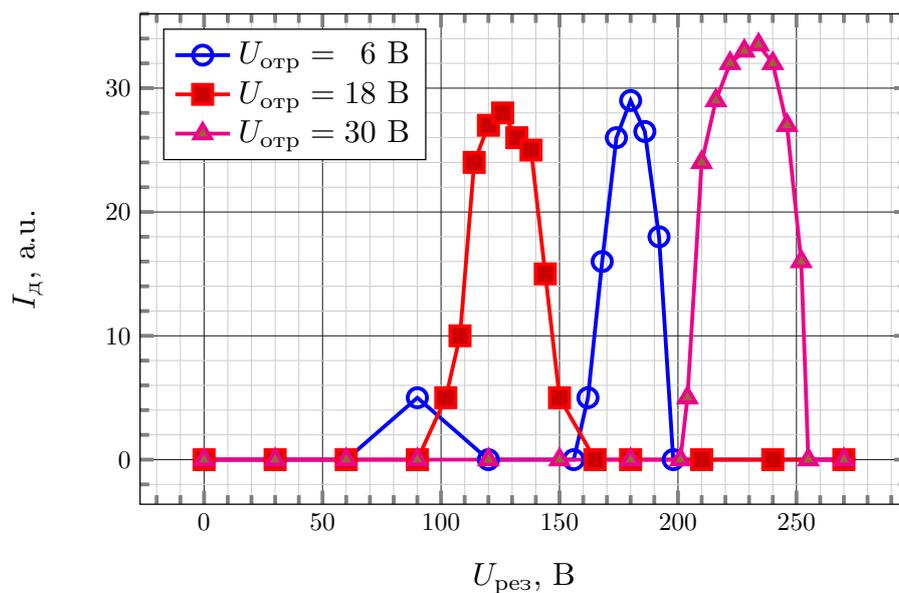


Рис. 8.

2.4. Частотные характеристики клистрона

С помощью волномера была измерена зависимость длины волны генерируемых колебаний от напряжения на отражателе (см. рис. 9, стр. 13), а также от напряжения на резонаторе (см. рис. 10, стр. 13) при нескольких фиксированных напряжениях на резонаторе и отражателе соответственно.

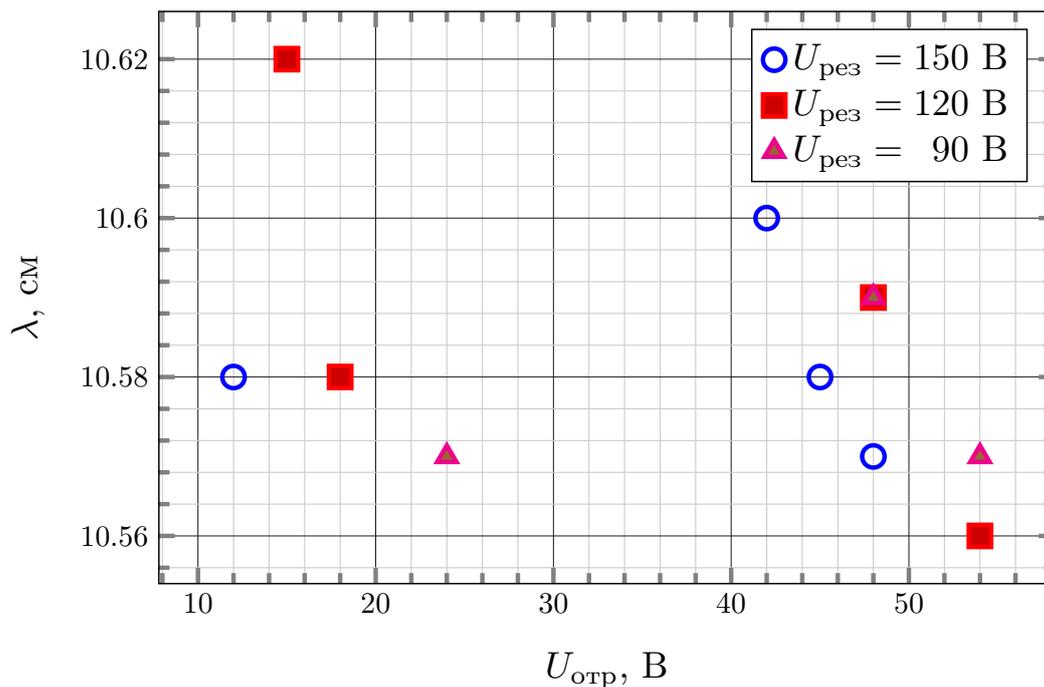


Рис. 9.

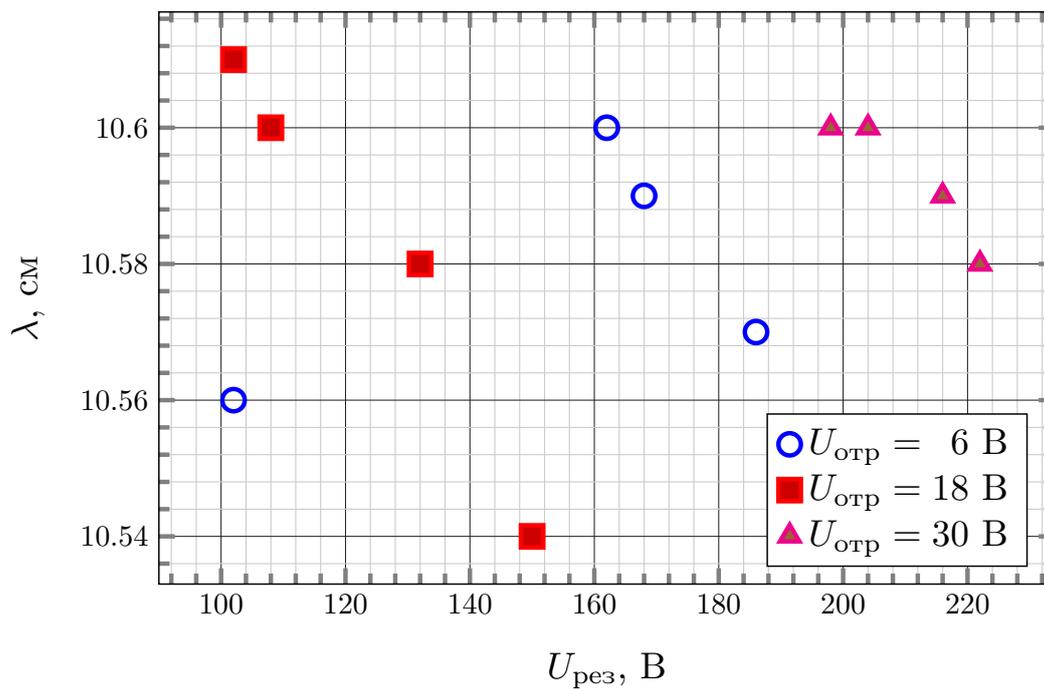


Рис. 10.

2.5. Определение пускового тока клистрона

Была снята зависимость тока детектора от тока пучка для различных зон генерации клистрона (см. рис. 11). На основании этих измерений возможно определить пусковой ток клистрона для каждой зоны. Регулировка тока пучка осуществлялась изменением величины потенциала на управляющем электроде.

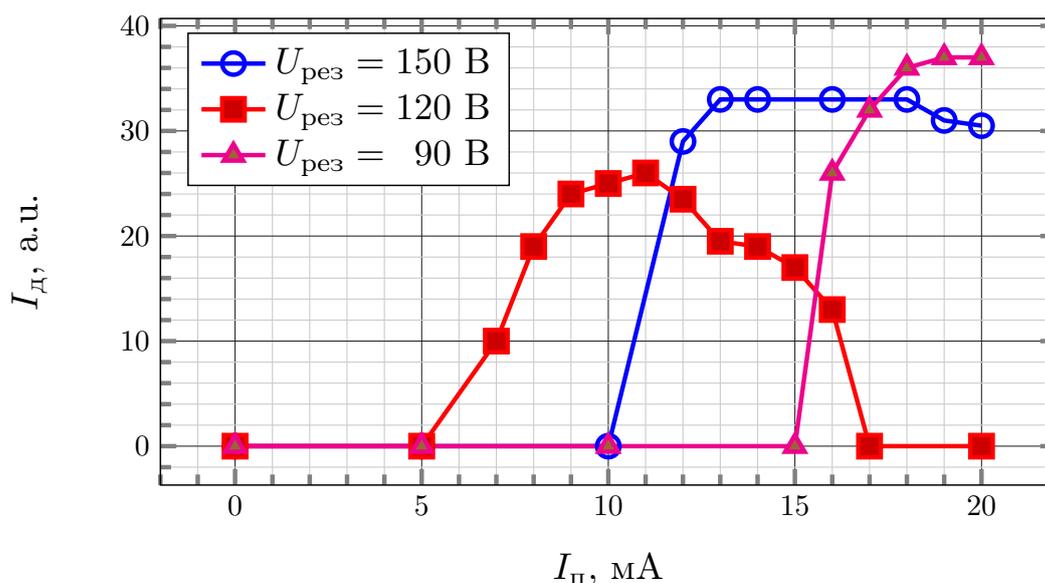


Рис. 11.

Заключение

В ходе работы было изучено устройство и основные принципы действия отражательного клистрона. Был изучен процесс динамического управления плотностью в электронном пучке, возбуждения переменным конвекционным током пучка колебаний в резонаторе.

Был достигнут оптимальный рабочий режим на потенциалах

$$U_{рез} = 168 \text{ В}, \quad U_{уск} = 123 \text{ В}, \quad U_{отр} = -30 \text{ В}.$$

Получены зависимости тока в цепи детектора от напряжения на отражателе при постоянном напряжении на резонаторе и от напряжения на резонаторе при постоянном напряжении на отражателе. При помощи волномера измерена длина волны колебаний, генерируемых клистроном. Получена зависимость тока в цепи детектора от тока электронного пучка для трёх зон генератора.

Список литературы

- [1] Гапонов В.И. Электроника. 4.11. М.: Физматгиз, 1960.
- [2] Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Ч.Н. М.: Высшая школа, 1972.
- [3] Коетиенко А.И. Введение в электронику СВЧ. М.: Изд. МГУ, 1989.
- [4] Градштейн И.С., Рыжик Н.М. Таблицы интегралов, сумм рядов и произведений. М., 1963.
- [5] Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988.