

РАСЧЕТ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА ИМПУЛЬСНОГО МОЩНОГО КЛИСТРОНА S-ДИАПАЗОНА

*А. Е. Левичев^{а, б, в, 1}, В. Я. Иванов^а, А. М. Барняков^{а, в},
С. Л. Самойлов^{а, в}*

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^в ЦКП «СКИФ», Кольцово, Россия

Представлен расчет объемного возбуждающего резонатора клистрона с учетом тока пучка. Проведена оценка нагрузки током пучка и изменения частоты резонатора. Получено значение внешней добротности для полного согласования резонатора с внешней линией с учетом тока пучка. Рассчитана энергия, приобретаемая частицами при пролете резонатора. Проведен анализ для неидеального согласования резонатора с внешней линией. Обсуждаются характеристики изготовленного резонатора клистрона. Приводятся результаты измерений его характеристик при наличии тока пучка.

The paper presents the calculation of the exciting cavity of the klystron taking into account the beam current. The beam current loading and the frequency shifting of the cavity are estimated. The value of the external quality factor for the complete matching of the cavity with the external line taking into account the beam current is obtained. The energy gain by the particles during the flight of the cavity is calculated. An analysis is given for the non-ideal matching of the cavity with the external line. The characteristics of the manufactured klystron cavity are discussed. The results of measuring its characteristics with the beam current are presented.

PACS: 29.27.Eg; 07.05.Tr

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН разработан многорезонаторный клистрон S-диапазона с выходной импульсной мощностью 50 МВт [1]. Одним из ключевых элементов данного изделия является возбуждающий резонатор. Он должен отвечать достаточно большому списку требований: быть согласованным с внешней линией возбуждения, работать на рабочей частоте при пролете пучка, быть вакуумно-плотным, иметь возможность корректировки частоты и связи после изготовления, стабильно работать без процессов самовозбуждения и пр. От возбуждающего резонатора зависит работоспособность всего клистрона.

¹E-mail: a.e.levichev@inp.nsk.su

Описание резонатора с пучком клистрона — достаточно сложная задача. В первую очередь это связано с тем, что геометрия резонатора является трехмерной в связи с наличием устройства ввода мощности. В отличие от резонатора с ускоряющим зазором, ограниченными сетками, для трехмерной модели необходимо учитывать не только продольную связь пучка с полем резонатора, но и поперечную, а электрическое поле не является сосредоточенным внутри зазора резонатора. В этом случае приходится использовать некоторые допущения и предположения. Такая теория не может дать точного решения, но позволяет быстро находить закономерности и получать результат, варьируя сразу множество параметров. Другими словами, используемый аналитический подход не предполагает однозначного совпадения с экспериментом, но позволяет определить правильные начальные параметры резонатора, которые могут быть уточнены при последующем численном моделировании.

Кроме аналитического расчета возбуждающего резонатора клистрона в работе приводятся результаты измерений характеристик изготовленного резонатора, полученные при испытании готового макета клистрона. Измерения проведены именно при наличии пучка клистрона, что позволяет сделать определенные выводы о начальных предположениях, полученных с помощью описанного метода. Другими словами, показан весь путь: от начала проектирования до готового рабочего изделия. Полученные данные и их сравнения с результатами экспериментов могут быть полезны при разработке других клистронов.

ОПИСАНИЕ РЕЗОНАТОРА

Разрабатываемый клистрон должен обладать параметрами, приведенными в табл. 1. Возбуждаемый резонатор располагается после анода электронной пушки. Пучок, который пролетает через него, должен иметь ток до 350 А при анодном напряжении до 350 кВ. Входная СВЧ-мощность от внешнего генератора — до 500 Вт с длительностью до 3,5 мкс. Рабочая частота клистрона 2856 МГц.

Модель резонатора приведена на рис. 1. Возбуждение осуществляется с помощью петли связи. Поскольку клистрон полностью помещается внутрь соленоида, имеются ограничения на узел соединения внешнего коаксиала. В связи с этим внешний разъем располагается под углом 90° к петле связи параллельно вакуумной камере клистрона. Внутренний проводник разъема имеет фланец, к которому крепится стержень, для чего используется дополнительная керамическая вставка, обеспечивающая необходимую вакуумную пайку фланца со стержнем. Сам фланец вводится внутрь коаксиаль-

Таблица 1. Параметры клистрона ИЯФ СО РАН

Параметр	Значение
Рабочая частота f_0 , МГц	2856
Выходная импульсная мощность, МВт	50
Входная мощность, Вт	500
Длительность СВЧ-импульса, мкс	1–3,5
Частота повторения, Гц	До 12
Ток пучка, А	350
Анодное напряжение, кВ	350

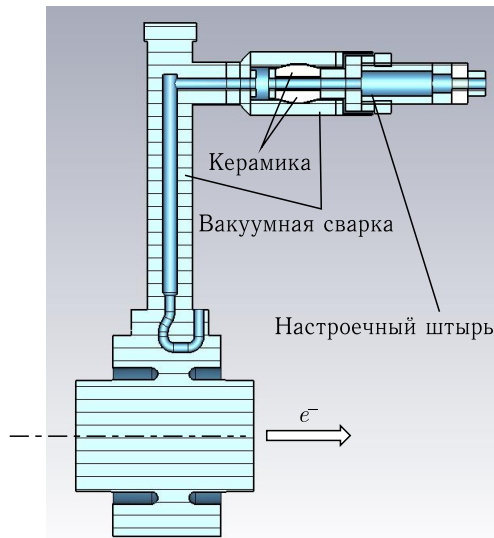


Рис. 1. Модель возбуждающего резонатора

ного разъема и приваривается к его внешней стенке. Крепление внутреннего стержня разъема и петли связи обеспечивается посредством винтового соединения. Связь внутренних проводников вакуумной части коаксиального разъема с внешней частью также осуществляется с помощью винтового соединения. Наружная стенка коаксиального ввода мощности крепится к вакуумной части с помощью фланцев и винтов.

Разработанная модель входного резонатора обладает рядом достоинств и недостатков. С одной стороны, обеспечивается необходимая вакуумная развязка внутренней (вакуумной) и внешней частей клистрона. Конструкция ввода мощности позволяет помещать клистрон внутрь соленоида. Внешнюю связь резонатора с возбуждающим усилителем можно регулировать в некотором диапазоне с помощью настроечного штыря (см. рис. 1), изменяя его диаметр. Данный штырь находится на воздухе и прикручивается к центральному штырю разъема, который уже является деталью вакуумной части ввода мощности. То есть процесс его замены достаточно прост. Основным недостатком предложенного разъема является керамическая часть, необходимая для создания вакуумной развязки. Данная керамика является емкостным элементом, в котором будет осуществляться процесс запасания электрической энергии. В итоге эта часть разъема может вести себя как отдельный резонатор. Другими словами, может получиться контур с двумя связанными резонаторами: резонатор клистрона и устройство ввода мощности. Однако, как следует из работ [2, 3], при правильном подборе связи между резонаторами и внешней линией можно добиться практически полного поступления СВЧ-мощности в основной резонатор.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА

Для расчета параметров возбуждающего резонатора воспользуемся эквивалентной схемой, представленной на рис. 2 [4]. Здесь используются обозначения: $R = 1/G$ — потери в стенках резонатора, G — активная проводимость стенок резонатора, G_b —

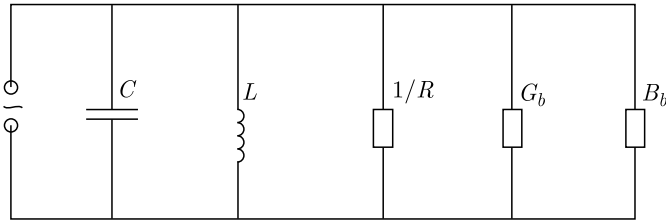


Рис. 2. Эквивалентная схема резонатора

активная внесенная проводимость пучка, B — реактивная проводимость самого резонатора, B_b — внесенная пучком реактивная проводимость, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC} = 2\pi f_0$ — круговая резонансная частота контура, L и C — эквивалентные сосредоточенные индуктивность и емкость резонатора без пучка, $\rho = \sqrt{L/C}$ — характеристическое сопротивление резонатора, которое для объемного резонатора можно найти по формуле

$$\rho = \frac{\left(\int E_z dz\right)^2}{2\omega_0 W}, \quad (1)$$

где E_z — продольная компонента электрического поля на оси резонатора; z — продольная координата; W — запасенная энергия в резонаторе [5]. Собственная добротность резонатора Q_0 определяется согласно выражению

$$Q_0 = \omega_0 CR = \frac{R}{L\omega_0} = \frac{R}{\rho} = \frac{1}{\rho G}. \quad (2)$$

Для резонансного контура, работающего на частоте вынужденных колебаний ω , известно выражение для реактивной проводимости [6, 7]

$$B = \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = \omega_0 C \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) \approx 2\frac{Q_0}{R}\delta\omega = 2GQ_0\delta\omega = 2\frac{\delta\omega}{\rho}, \quad (3)$$

где $\delta\omega = (\omega - \omega_0)/\omega_0$ — относительная расстройка резонатора. Таким образом, можно записать, что относительная расстройка резонатора определяется реактивной составляющей проводимости

$$\delta\omega \approx 0,5B\rho. \quad (4)$$

Пучок в резонаторе, с одной стороны, должен поглощать СВЧ-мощность резонатора, с другой стороны, вносит дополнительную емкостную составляющую. Другими словами, пучок добавляет в резонансный контур дополнительные активную и реактивную проводимости. В этом случае на основе выражения (4) можно утверждать, что при наличии реактивной составляющей проводимости, вносимой пучком, частота резонатора изменится согласно дополнительной расстройке

$$\delta\omega \approx -0,5B_b\rho. \quad (5)$$

Здесь отрицательный знак говорит о том, что пучок уменьшает частоту резонатора в силу своего емкостного характера. Поскольку пучок приносит также активную

проводимость G_b , то с учетом выражения (2) можно считать, что появится дополнительная добротность, связанная с пучком:

$$Q_b = \frac{1}{G_b \rho}. \quad (6)$$

В итоге полная добротность резонатора без учета нагрузки внешним контуром будет определяться как

$$Q_{ut} = \frac{1}{1/Q_0 + 1/Q_b}. \quad (7)$$

В свою очередь, полную активную проводимость контура можно найти из выражения

$$G_t = \frac{1}{Q_{ut} \rho}. \quad (8)$$

Если рассматривать работу резонатора в полосе частот, то полное реактивное сопротивление будет иметь вид

$$B_t(\delta\omega) \approx 2 \frac{\delta\omega}{\rho} + B_b. \quad (9)$$

Теперь из выражений (8) и (9) можно записать полную проводимость резонатора с пучком:

$$Y_t(\delta\omega) = G_t + jB_t. \quad (10)$$

С учетом проделанных заключений получим коэффициент отражения от возбуждающего резонатора клистрона при наличии пучка:

$$\Gamma(\delta\omega) = \frac{G_e - Y_t(\delta\omega)}{G_e + Y_t(\delta\omega)}. \quad (11)$$

Здесь G_e — проводимость внешней линии, которую можно найти, зная внешнюю добротность резонатора Q_e согласно (2):

$$G_e = \frac{1}{Q_e \rho}. \quad (12)$$

Из формулы (5) следует, что реактивная проводимость, вносимая пучком B_b , приводит к изменению частоты резонатора. Если начальная частота резонатора выбрана с учетом этого эффекта, т. е. выше рабочей частоты, то можно добиться выполнения условия $B_t(\delta\omega_0) = 0$ при пролете пучка.

Напряжение в резонаторе с учетом мощности внешнего генератора P_g найдем из выражения [8, 9]

$$V = \frac{2}{1 + \beta} \sqrt{2P_g Q_{ut} \rho}. \quad (13)$$

Стоит отметить, что эффективное среднеквадратичное значение напряжения будет отличаться от приведенного выше:

$$V_{rms} = \frac{2}{1 + \beta} \sqrt{P_g Q_{ut} \rho}. \quad (14)$$

Выражение (11) включает в себя параметры резонатора как без пучка, так и с пучком. К первым можно причислить следующие: собственная круговая частота ω_0 , собственная добротность Q_0 , характеристическое сопротивление ρ , внешняя добротность Q_e . С пучком добавляются реактивная (B_b) и активная (G_b) проводимости. Параметры резонатора без пучка хорошо моделируются многими современными кодами, такими как SUPERFISH [10], CST-Studio [11] и др. Проводимости, привносимые в резонатор пучком, рассчитать в явном виде значительно труднее.

Аналитический вывод B_b и G_b сильно зависит от используемой модели резонатора. Так, для резонатора с двумя сетками подробный вывод активной и реактивной составляющих проводимости приведен в работах [12–14]:

$$G_{bg} = \frac{I}{U} \frac{1 - \frac{\theta_d}{2} \sin \theta_d - \cos \theta_d}{\theta_d^2} \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b + 1)}, \quad (15)$$

$$B_{bg} = \frac{I}{U} \frac{\sin \theta_d - \frac{\theta_d}{2}(1 + \cos \theta_d)}{\theta_d^2} \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b + 1)}, \quad (16)$$

где I — ток пучка; U — напряжение катод–анод; $\theta_d = \beta d$ — пролетный угол, $\beta = \omega_0/v$, ω_0 — круговая частота резонатора, v — скорость электронов; γ_b — релятивистский фактор. Для определения пролетного угла используется промежуток взаимодействия с резонатором d . Для сеточного резонатора можно считать, что расстояние между сетками равно промежутку d . В выражениях (15), (16) учтена релятивистская поправка, связанная с напряжением пучка согласно работе [15].

Для трехмерного резонатора вывод реактивностей, вносимых пучком, значительно сложнее. Например, выражение для G_b можно найти в работе [14]:

$$G_{bc} = \frac{I}{U} M^2 \left[\left(\frac{1}{m_b^2} - \frac{\theta_b^2}{4} \right) \left(1 - \frac{\theta_d}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_d}{2} + \frac{1}{2} \theta_a^2 m_a \right) - \frac{\theta_b^2}{4} \right] \frac{2}{\gamma_b(\gamma_b + 1)}. \quad (17)$$

Здесь используются следующие обозначения: $\theta_b = \beta b$, $\theta_a = \beta a$ — пролетные углы, связанные с радиусами пучка b и вакуумной камеры a соответственно, $m_b = = 2 \frac{I_1(\theta_b)}{\theta_b I_0(\theta_b)}$, $m_a = 2 \frac{I_1(\theta_a)}{\theta_a I_0(\theta_a)}$ — коэффициенты связи ($I_0(x)$ и $I_1(x)$ — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно), а коэффициент связи пучка с резонатором M находим по формуле

$$M = \frac{\sin \left(\frac{\theta_d}{2} \right) 2I_1 \left(\frac{\theta_b}{\gamma_b} \right)}{\frac{\theta_d}{2} \frac{\theta_b}{\gamma_b} I_0 \left(\frac{\theta_a}{\gamma_b} \right)}.$$

В формулу (17) включена релятивистская поправка.

В выражении (17), так же как и в (15), используется пролетный угол взаимодействия с резонатором θ_d . Объемный резонатор имеет зазор, связывающий его с пролетным каналом (см. рис. 1), но в отличие от сеточного резонатора поле взаимодействия с пучком не сосредоточено в данном зазоре. Эффективная длина, на которую

распространяется электрическое поле резонатора, значительно больше, чем зазор резонатора, что представляет некоторую трудность при расчете.

Практически во все выражения (1)–(17) входит напряжение, приобретаемое пучком в пушке клистрона. В табл. 1 приведены анодное напряжение пушки 350 кВ и ток пучка 350 А. Для строгого анализа необходимо учесть провисание напряжения, вызванное влиянием объемного заряда пучка. Дополнительный анализ показал, что уменьшение напряжения происходит меньше чем на 3%. Данное значение не оказывает существенного влияния на параметры резонатора, и им можно пренебречь.

В результате моделирования резонатора, представленного на рис. 1, получены следующие параметры: характеристическое сопротивление $\rho = 68$ Ом, шунтовое сопротивление $R_{sh} = 0,72$ МОм, собственная добротность $Q_0 = 5430$. Распределение электрического поля на оси резонатора показано на рис. 3. Радиус пролетного канала $a = 15,85$ мм. Длина зазора связи с пролетной камерой 9 мм.

Из рис. 3 видно, что, несмотря на зазор связи резонатора с пролетной камерой 9 мм, распределение поля значительно «вываливается» за данную область. Для использования выражения (17) в промежутке взаимодействия пучка с полем d , определяющего пролетный угол θ_d , была выбрана ширина на полувысоте распределения энергии, показанного на рис. 3, которая составила $d = 24$ мм. Кроме угла θ_d в выражении (17) необходимо найти поперечные пролетные углы, связанные с размером вакуумной пролетной камеры и размером пучка. Первый угол фиксированный и определяется радиусом $a = 15,85$ мм. Для определения угла θ_b использовалось значение радиуса пучка $b = 11$ мм. Отдельное моделирование пушки клистрона показало именно такой радиус в области возбуждающего резонатора для наиболее гладкой огибающей пучка в клистроне. Данный размер пучка связан с выбранным магнитным полем и, вообще говоря, может меняться при варьировании амплитуды поля. Для полного прохождения тока пучка величина b способна меняться в пределах $b = 8–14$ мм в области возбуждающего резонатора. При этом пульсации амплитуды радиуса пучка вдоль всего клистрона будут не более 2,5 мм. Таким образом, рабочий диапазон радиусов в первом резонаторе может отличаться от расчетного значения, а магнитное поле может быть подстроено в рабочем клистроне с точки зрения максимальной выходной СВЧ-мощности и устойчивости пучка. Тем не менее для первоначального анализа радиус пучка в возбуждающем резонаторе взят равным $b = 11$ мм.

На рис. 4 показаны зависимости активной проводимости первого возбуждающего резонатора клистрона от разных значений тока пучка, полученных с помощью выражения (17) при постоянном первеансе $P_\mu = 1,7$ мкА/В^{1,5} пушки клистрона, который соответствует току 350 А и напряжению 350 кВ. На этом же рисунке показаны активные проводимости, полученные с помощью выражения для сеточного резонатора (15). В этом случае пролетный угол θ_b специально подбирался для достижения наилучшего

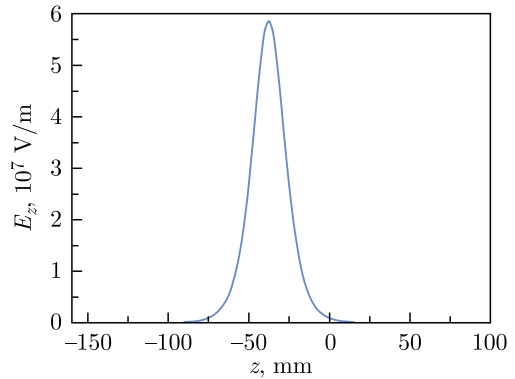


Рис. 3. Распределение электрического поля на оси резонатора при запасенной энергии 1 Дж

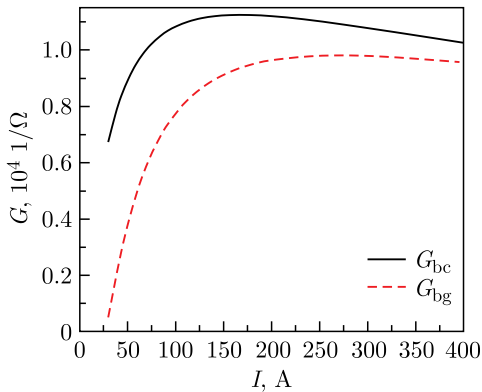


Рис. 4. Активная проводимость, вносимая пучком в резонатор, в зависимости от тока пучка при постоянном первеансе $P_\mu = 1,7 \text{ мкА/В}^{1,5}$. Сплошная линия — значения, полученные для объемного бессеточного резонатора, штриховая — для сеточного зазора с увеличенной эффективной длиной взаимодействия с пучком

согласия с выражением (17). В итоге значение пролетного угла для выражения (15) составило 204° против 102° для выражения (17), т. е. эффективная длина взаимодействия в 2 раза больше, чем для объемного резонатора величиной $d = 48 \text{ мм}$. Другими словами, эффективная длина взаимодействия сеточного зазора резонатора выше, чем для бессеточного, что согласуется с данными работы [16]. Из графика видно, что наилучшее согласование достигается в области высоких токов, что соответствует высоким напряжениям. При значениях $I = 350 \text{ А}$ и $U = 350 \text{ кВ}$ разница между активными проводимостями для трехмерного и сеточного представления резонатора находится в области 7%.

Сравнения, описанные выше и показанные на рис. 4, необходимы для расчета изменения частоты резонатора из-за емкостного характера пролетающего пучка, которое можно найти с помощью реактивной проводимости (5). Вывод выражения для реактивной проводимости для трехмерного резонатора затруднителен, поэтому можно воспользоваться выражением (16) для сеточного резонатора, используя подобранный пролетный угол и эффективный промежуток взаимодействия, которые при-

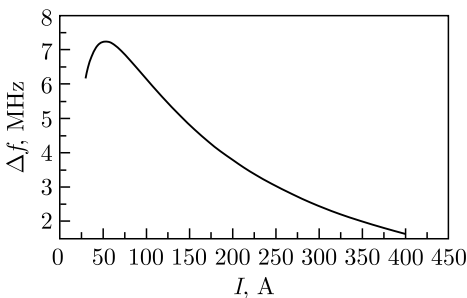


Рис. 5. Зависимость частоты резонатора от тока пучка при постоянном первеансе $P_\mu = 1,7 \text{ мкА/В}^{1,5}$

менялись для получения графиков на рис. 4. На рис. 5 показано изменение частоты входного резонатора для разных токов пучка при постоянном первеансе $P_\mu = 1,7 \text{ мкА/В}^{1,5}$, вычисленное с помощью выражения (5). Из приведенного графика видно, что при напряжении 350 кВ максимальное изменение частоты для тока 350 А составляет примерно 2 МГц. Напомним, что именно при высоких напряжениях наблюдается наилучшее согласие между активными проводимостями (см. рис. 4).

Теперь с помощью выражения (9) можно оценить реактивную составляющую про-

водимости резонатора. Резонатор настроен с учетом изменения частоты, показанного на рис. 5, для значения тока $I_0 = 350 \text{ А}$ и напряжения $U_0 = 350 \text{ кВ}$, что соответствует микрпервеансу $P_\mu = 1,7 \text{ мкА/В}^{1,5}$ и расстройке резонатора $|\delta\omega| = 6,9 \cdot 10^{-4}$. Другими

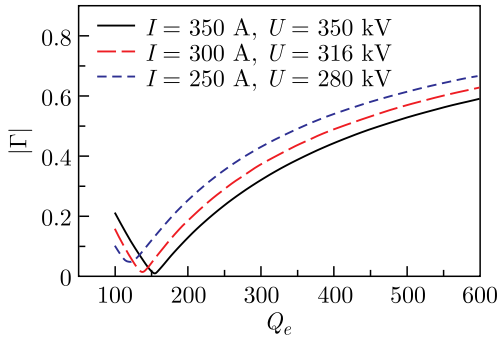


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от внешней добротности резонатора при фиксированных значениях расстройки и первеанса

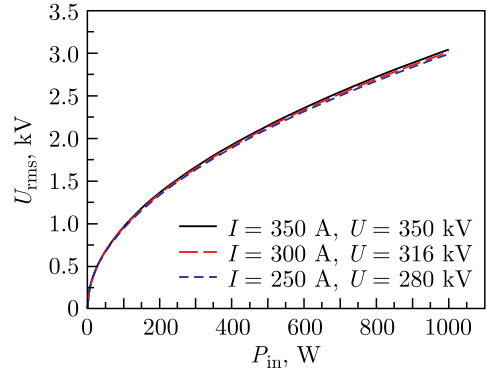


Рис. 7. Среднеквадратичное напряжение, получаемое пучком, в зависимости от входной мощности при внешней добротности $Q_e \approx 130$

словами, при таких значениях параметров пучка реактивная составляющая проводимости равна нулю. С учетом этого на рис. 6 показаны графики зависимости коэффициента отражения (11) от внешней добротности резонатора для разных значений токов пучка при фиксированном микропервеансе $P_\mu = 1,7 \text{ мкА/В}^{1,5}$ и расстройке резонатора $|\delta\omega| = 6,9 \cdot 10^{-4}$.

Из рис. 6 видно, что минимальное отражение находится вблизи значения внешней добротности $Q_e \approx 130$. Поскольку расстройка резонатора фиксированная, то при токах, отличных от $I_0 = 350 \text{ А}$, появляется отражение. Однако даже для значения тока 250 А отражение по мощности составляет менее 1%. С учетом расчетной собственной добротности $Q_0 = 5430$ и внешней добротности $Q_e \approx 130$ резонатора коэффициент связи должен быть равен $\beta = 41,8$. На рис. 7 показано среднеквадратичное напряжение (14), набираемое пучком при пролете через резонатор при внешней добротности $Q_e \approx 130$ и фиксированных значениях расстройки и первеанса. Видно, что для всех токов напряжение практически одинаковое и, например, при входной СВЧ-мощности 500 Вт составляет примерно 2 кВ.

В реальности с учетом имеющегося дизайна резонатора и элемента ввода мощности достичь значений коэффициента связи $\beta = 41,8$ и внешней добротности $Q_e \approx 130$ затруднительно. Коэффициент связи будет значительно меньше вычисленного для минимального отражения и будет близким к $\beta = 41,8$. В этом случае внешняя добротность составит $Q_e = 543$, а отражение по мощности составит примерно 36% согласно графикам рис. 6. На рис. 8

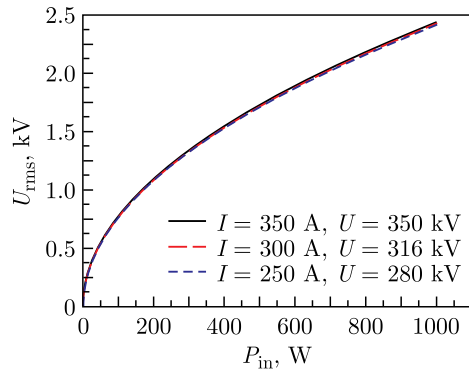


Рис. 8. Среднеквадратичное напряжение в резонаторе в зависимости от входной мощности при внешней добротности $Q_e \approx 543$

продемонстрированы среднеквадратичные напряжения при такой внешней добротности согласно выражению (14). В этом случае при входной мощности 500 Вт среднеквадратичное изменение энергии пучка составит около 1,7 кэВ.

ИЗМЕРЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕННОГО РЕЗОНАТОРА

На рис. 9 показан изготовленный возбуждающий резонатор в составе клистрона. Как было описано выше, для настройки коэффициента связи используется центральный штырь СВЧ-ввода мощности (см. рис. 1). Для корректировки частоты резонатора имеются специальные места, подготовленные для деформации.

В результате были достигнуты параметры, приведенные в табл. 2. Изготовленный резонатор, входящий в состав готового клистрона, позволил измерить микропервеанс катода, который составил $P_\mu = 1,5 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Это значение оказалось ниже расчетного и связано, скорее всего, с ошибкой выставления катода относительно анода. Предположительно расстояние катод-анод оказалось больше расчетного примерно на 1 мм. Данное значение микропервеанса позволяет работать с клистроном при токе 310 А и напряжении 350 кВ. Результат измерений важен для сравнения полученных характеристик изготовленного возбуждающего резонатора с расчетными.

Согласно табл. 2 собственная добротность резонатора получилась ниже расчетной. Скорее всего, это связано с технологией пайки петли связи. Данный процесс трудноконтролируемый, особенно в месте припоя. Предположительно, именно в этом месте произошло увеличение омических потерь, что сказалось на величине добротности.

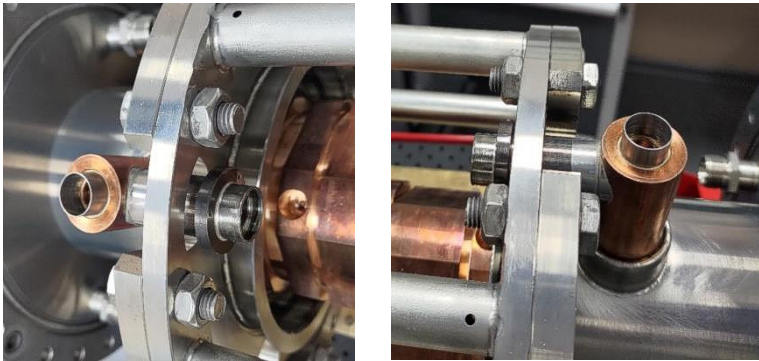


Рис. 9. Изготовленный возбуждающий резонатор в составе клистрона

Таблица 2. Достигнутые при измерении параметры входного резонатора клистрона

Параметр	Значение
Частота f_0 , МГц	2857 (на воздухе)
Коэффициент связи β	10
Нагруженная добротность Q_L	240
Собственная добротность Q_0	2640
Внешняя добротность Q_e	264
Микропервеанс P_μ , мкА/В ^{3/2}	1,5

Частота, приведенная в табл. 2, измерена на воздухе, т.е. после достижения вакуума она увеличится и составит примерно 2858 МГц. Согласно оценкам, приведенным на рис. 5, данная частота соответствует ожидаемому изменению.

В связи с измеренными параметрами резонатора и с учетом предположения о сохранении характеристического сопротивления напряжение, которое будет возбуждаться в резонаторе при пролете пучка с током 310 А, показано на рис. 10. Поскольку измеренная собственная добротность меньше расчетной, то и внешняя добротность уменьшилась, что привело к увеличению напряжения. Также данный эффект привел к уменьшению отражения СВЧ-мощности. В итоге при входной мощности среднеквадратичное напряжение должно составить примерно 2 кВ, а отражение по мощности — около 8%.

На рис. 11 показана измеренная с помощью циркулятора огибающая отраженного сигнала из резонатора при отсутствии пучка на рабочей частоте 2856 МГц. Представленный результат получен с клистрона, установленного на рабочем стенде без включения магнитного поля соленоида. При включении соленоида без пучка в резонаторе наблюдался высокочастотный резонансный разряд (мультипактор). Характерный вид осциллограммы с таким разрядом представлен на рис. 12. При появлении пучка данный разряд исчезал. Это связано с тем, что поля, наводимые пучком, нарушают условие резонанса, и разряд не развивается. На рис. 13 продемонстрирован отраженный сигнал при наличии пучка в клистроне с включенным магнитным полем соленоида. Видно, что мультипактор отсутствует, а СВЧ-мощность частично погло-

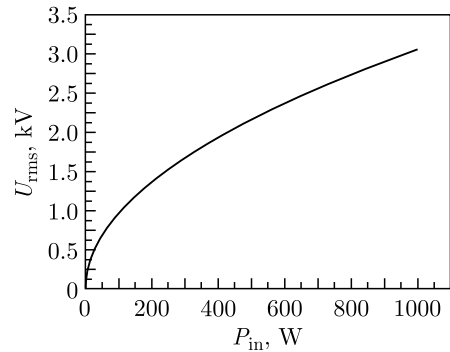


Рис. 10. Среднеквадратичное напряжение изготовленного резонатора при пролете тока пучка 310 А с ускоряющим напряжением между катодом и анодом 350 кВ

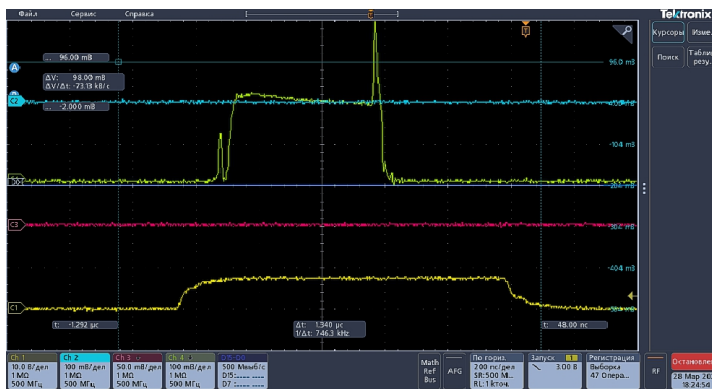


Рис. 11 (цветной в электронной версии). Огибающая отраженного сигнала из резонатора при отсутствии пучка без магнитного поля соленоида: C4 (зеленый) — отраженный сигнал из резонатора; C1 (желтый) — импульс запуска

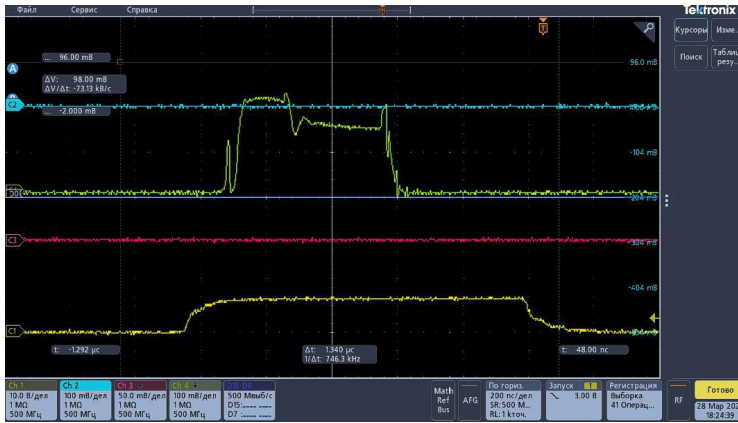


Рис. 12 (цветной в электронной версии). Огибающая отраженного сигнала из резонатора при отсутствии пучка при наличии магнитного поля соленоида: C4 (зеленый) — отраженный сигнал из резонатора; C1 (желтый) — импульс запуска

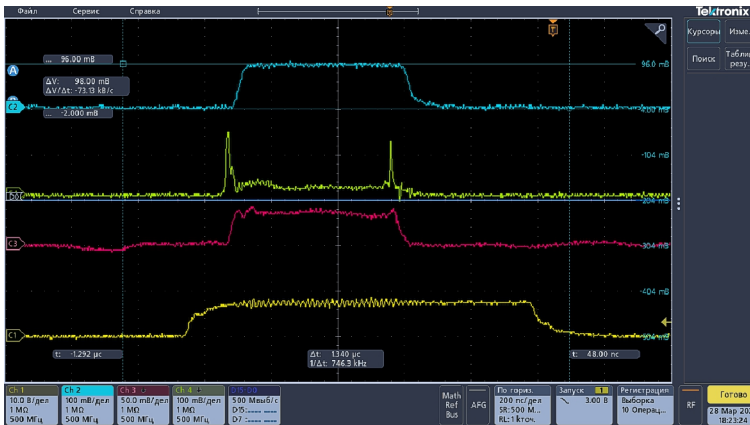


Рис. 13 (цветной в электронной версии). Огибающая отраженного сигнала из резонатора при токе пучка 300 А при наличии магнитного поля соленоида: C1 — импульс запуска; C3 — отраженный сигнал от волноводного вакуумного СВЧ-окна; C2 — поступающий в нагрузку сигнал после волноводного вакуумного СВЧ-окна; C4 (зеленый) — отраженный сигнал из резонатора

щается пучком. Зависимость отраженного сигнала от входного резонатора при разном значении тока пучка показана на рис. 14.

Приведенные на рис. 14 результаты не дают возможности однозначного их сравнения с расчетным коэффициентом отражения. Во-первых, детекторная головка не была прокалибрована с целью измерения мощности, во-вторых, магнитное поле соленоида подбиралось исходя из максимальной выходной СВЧ-мощности, а реальный размер

пучка в области возбуждающего резонатора неизвестен. Однако в зависимости от этой величины значительно меняются расчетные данные. Тем не менее результаты измерений показывают, что входной резонатор настроен и рассчитан достаточно верно, что позволяет получать необходимую СВЧ-мощность в согласованной нагрузке клистрона [1].

Отдельно стоит упомянуть резонансный вторично-эмиссионный разряд (мультипактор), который возникает в резонаторе без пучка при наличии магнитного поля. Данный вопрос продолжает исследоваться, но очевидно, что поля от пучка способствуют его подавлению. Экспериментальные данные и предварительные расчеты показывают, что наиболее вероятно развитие мультипактора в емкостном зазоре резонатора. Несмотря на то, что поле пучка подавляет эмиссионный разряд, имеются такие значения амплитуды сопровождающего поля, которые могут приводить к появлению вторично-эмиссионных процессов даже при наличии пучка. В этом случае магнитное поле нужно значительно ослаблять. При этом движение пучка в резонаторе становится неустойчивым, т. е. такой режим заведомо не является рабочим. Таким образом, видно, что магнитное поле существенно влияет на работу клистрона, даже если оно обеспечивает 100%-е токопрохождение. Изучение вторично-эмиссионного разряда в возбуждающем резонаторе клистрона будет продолжено.

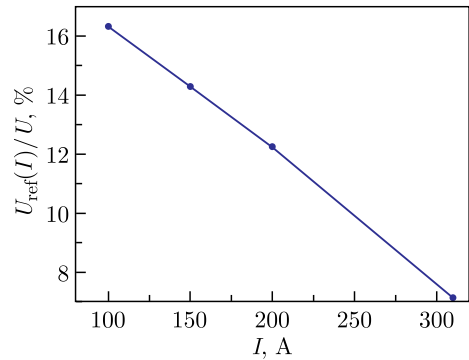


Рис. 14. Отношение напряжения отраженного от первого резонатора сигнала при наличии пучка к напряжению отраженного сигнала без пучка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ, проделанный для расчета возбуждающего резонатора клистрона, не является абсолютно точным. В нем имеются определенные допущения. При этом, как показывает имеющийся опыт, процессы, которые могут возникать в данном резонаторе, значительно сложнее и не могут полностью описываться аналитической моделью. Тем не менее приведенный анализ позволяет понять и проследить основные зависимости и закономерности. Достоинством такой аналитической модели в отличие от численного моделирования является возможность быстрого изменения различных параметров и получение более широкого представления о некоторых физических явлениях. Очевидно, что аналитический расчет не должен заменять численное моделирование, но он позволяет выбрать наиболее оптимальные исходные данные. Изготовленный в ИЯФ СО РАН клистрон подтверждает продуктивность такого подхода. Прямые измерения возбуждающего резонатора продемонстрировали правильность выбора его дизайна, исходных параметров и заложенных возможностей по оптимизации.

Процессы, которые могут возникать в возбуждающем резонаторе клистрона, не определяются только предложенной моделью, а являются значительно более сложными. В данной работе основное внимание уделялось характеристикам, связанным с продольным движением пучка. Как показал опыт, поперечное движение оказывает

не меньшее влияние на работу резонатора и всего клистрона в целом. Кроме того, в клистроне могут иметь место явления, связанные с различными процессами самовозбуждения, в том числе и в первом резонаторе. Все это не может быть проанализировано в рамках предложенной теории и требует дополнительного исследования, которое будет продолжено.

Финансирование. Работа частично выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (FWUR-2024-0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levichev A., Barnyakov A., Samoylov S. et al.* Development and Testing of a High-Power S-Band Klystron at BINP SB RAS // Nucl. Sci. Techn. 2024. V. 35, No 7. Art. No. 117.
2. *Черноусов Ю. Д., Иванников В. И., Шеболаев И. В., Левичев А. Е., Павлов В. М.* Полосовые характеристики связанных резонаторов // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 8. С. 923–929.
3. *Барняков А. М., Левичев А. Е., Никифоров Д. А.* Коэффициент межрезонаторной связи объемных резонаторов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 7. С. 646–651.
4. *Асеев Б. П.* Основы радиотехники. М.: Связьиздат, 1947. С. 42–59.
5. *Хаби В. С.* Измерение характеристического сопротивления резонатора с бессеточным зазором // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1971. Вып. 3. С. 138–140.
6. *Асеев Б. П.* Основы радиотехники. М.: Связьиздат, 1947. С. 76.
7. *Лебедев И. В.* Техника и приборы СВЧ. Т. 1. М.: Высш. шк., 1970. С. 307.
8. *Иванников В. И., Павлов В. М., Черноусов Ю. Д., Шеболаев И. В.* Влияние переходных процессов в ускоряющем резонаторе на энергетический разброс частиц // ЖТФ. 2004. Т. 74, № 6. С. 134–136.
9. *Vaughan J. R. M.* The Input Gap Voltage of a Klystron // Trans. Electron Devices. 1985. V. ED-32, No. 11. P. 2510–2511.
10. *Halbach K., Holsinger R. F.* SUPERFISH — A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry // Part. Accel. 1976. V. 7, No. 4. P. 213–222.
11. Electronic Resource CT Microwave Studio. <https://www.mathworks.com/>.
12. *Кацман Ю. А.* Приборы сверхвысоких частот. Т. 2. М.: Высш. шк., 1974. С. 104.
13. *Gewartowski J. W., Watson H. A.* Principles of Electron Tubes. Princeton, NJ: D. van Nostrand, 1965. P. 212.
14. *Branch G. M.* Electron Beam Coupling in Interaction Gaps of Cylindrical Symmetry // Trans. I. R. E. 1961. V. ED-8, No. 3. P. 193–207.
15. *Кацман Ю. А.* Приборы сверхвысоких частот. Т. 2. М.: Высш. шк., 1974. С. 371.
16. *Кацман Ю. А.* Там же. С. 116.

Получено 13 августа 2024 г.