

Клистроны

Научная сессия ИЯФ 2024

А.Е. Левичев
Сектор 5-13

A.E.Levichev@inp.nsk.su
01.02.2024

Введение

Всего было изготовлено 4 прототипа клистрона.

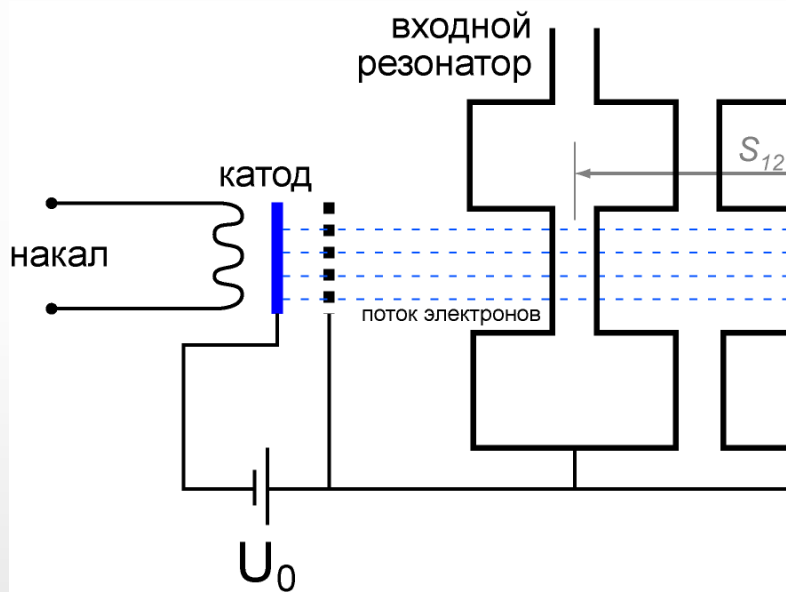
Первый прототип (Клистрон 0) состоит из:

- Катодный узел с высоковольтным изолятором
- Коллектор
- Магнитная система
- Пролетная камера

Данный прототип не подразумевал группировки пучка, а нужен был для отработки технологий изготовления катодного узла, коллектора, магнитной системы и пр. На данном прототипе был получен первый опыт активации катода и тренировки высоким напряжением. Были исследованы вопросы, связанные с токопрохождением пучка и пробоями.

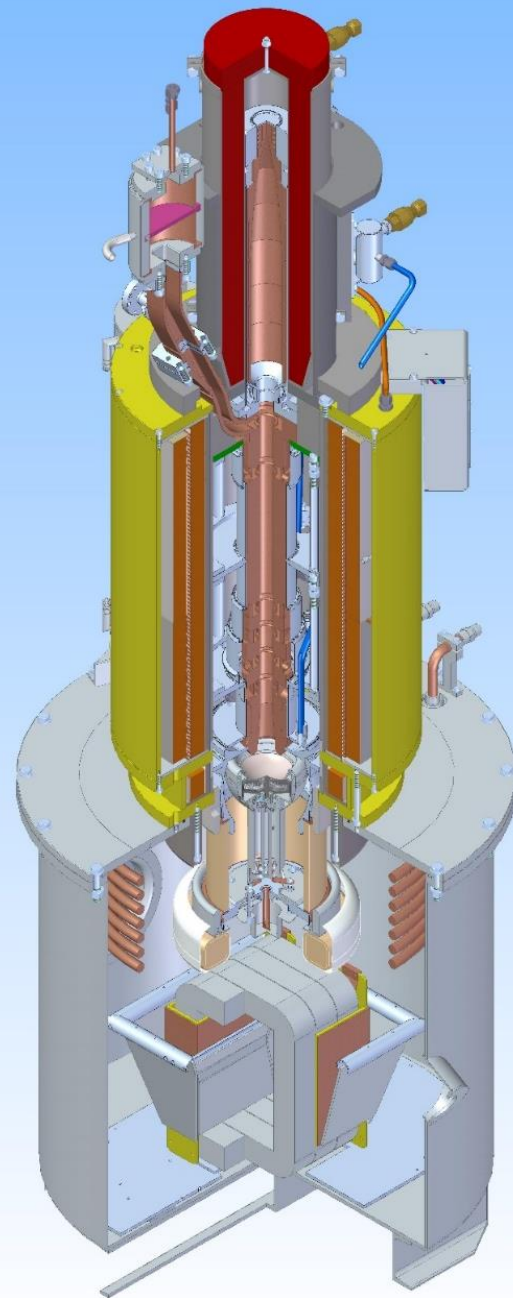
Следующие 3 прототипа состояли из всех необходимых элементов, включая систему группировки. Все элементы разработаны и изготовлены в ИЯФ СО РАН, за исключением катода, который был произведен НПП «Базовые СВЧ технологии»

Клистрон — электровакуумный прибор, в котором происходит путём модуляции скорости (в входном резонаторе СВЧ) и последующей группировки (в выходном резонаторе СВЧ) электронного потока (в пространстве дрейфа, свободном от СВЧ-поля).



Задача: изготовить клистрон с параметрами:

1. Частота 2856 МГц
2. Выходная импульсная мощность 100 Вт
3. Длительность импульса 1-3.5 мкс
4. Частота повторения 1-50 Гц



электронного потока электронов в переменный СВЧ (при пролёте их сквозь зазор объёмного резонатора) и последующей группировки (в пространстве дрейфа, свободном от СВЧ-поля).

особенности работы и проектирования:

У клистрона имеется рабочая частота, но ни один резонатор не настраивается на эту частоту

Только 1 активный резонатор – возбуждающий. Он связан с внешней линией. Группирующие резонаторы пассивные и не имеют внешней связи

Выходной резонатор связан с нагрузкой и служит для отбора мощности от пучка электронов

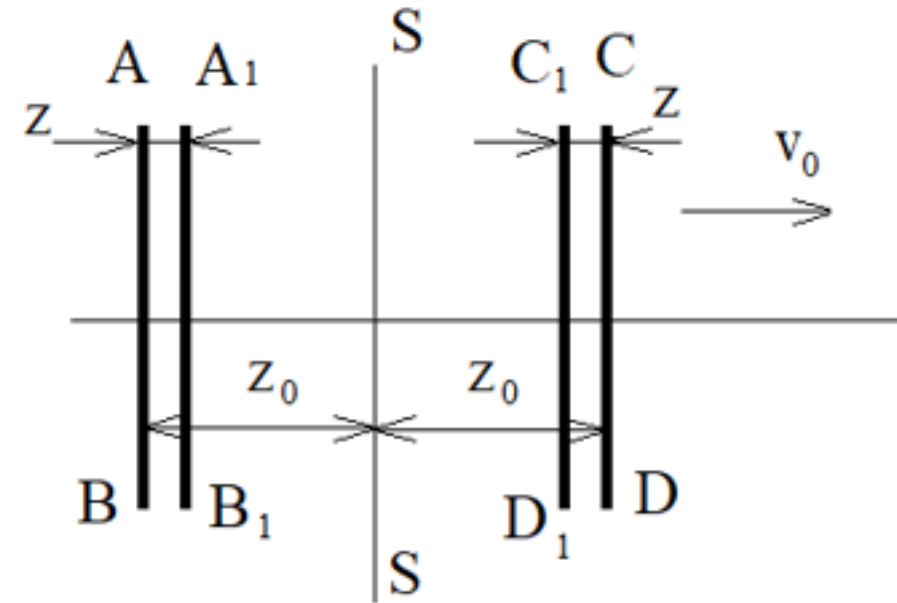
Группировку определяют как резонаторы, так и расстояния между ними

Пучок должен возбуждать резонаторы максимальным образом, но не должен теряться на апертуре

Пучок должен возбуждать основную моду, но не поперечные

Клистрон

Рассмотрим электронный поток бесконечного сечения, который движется вдоль координаты z с постоянной компонентой скорости v_0 . Пусть два слоя AB и CD располагаются симметрично относительно плоскости SS с координатой z_0 , как показано на рисунке 1. При наличии скоростной модуляции Δv будем полагать, что слой AB ускорился, а CD замедлился, то есть они имеют скорости $v_0 + \Delta v$ и $v_0 - \Delta v$ соответственно. В этом случае будет появляться модуляция плотности заряда $\Delta\rho = 2\rho_0 z$, где ρ_0 – изначальная равномерная плотность заряда, z – расстояние, которое прошли слои AB и CD. С учетом изменения плотности заряда, будет возникать продольная компонента электрического поля, отнесенная к единице поверхности слоев (ϵ_0 - диэлектрическая постоянная).



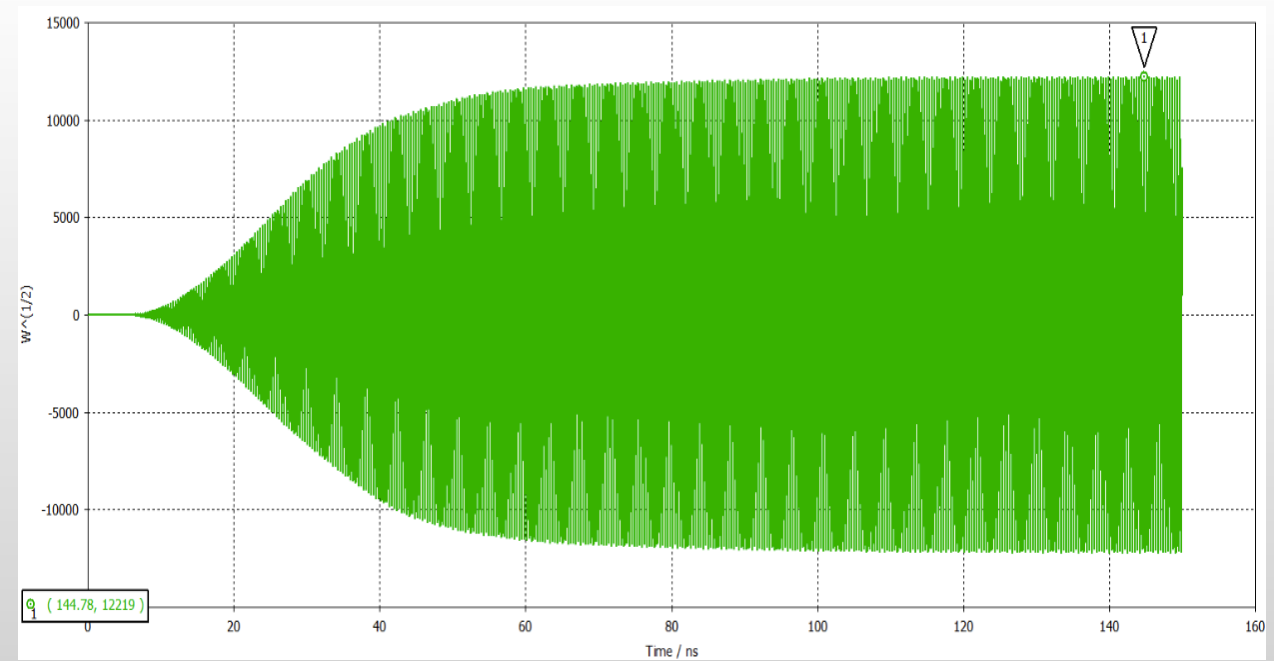
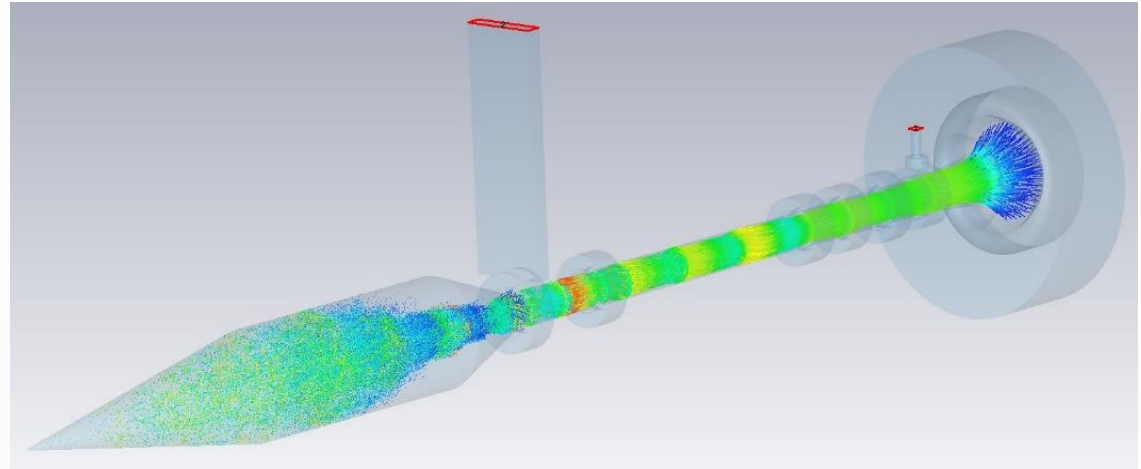
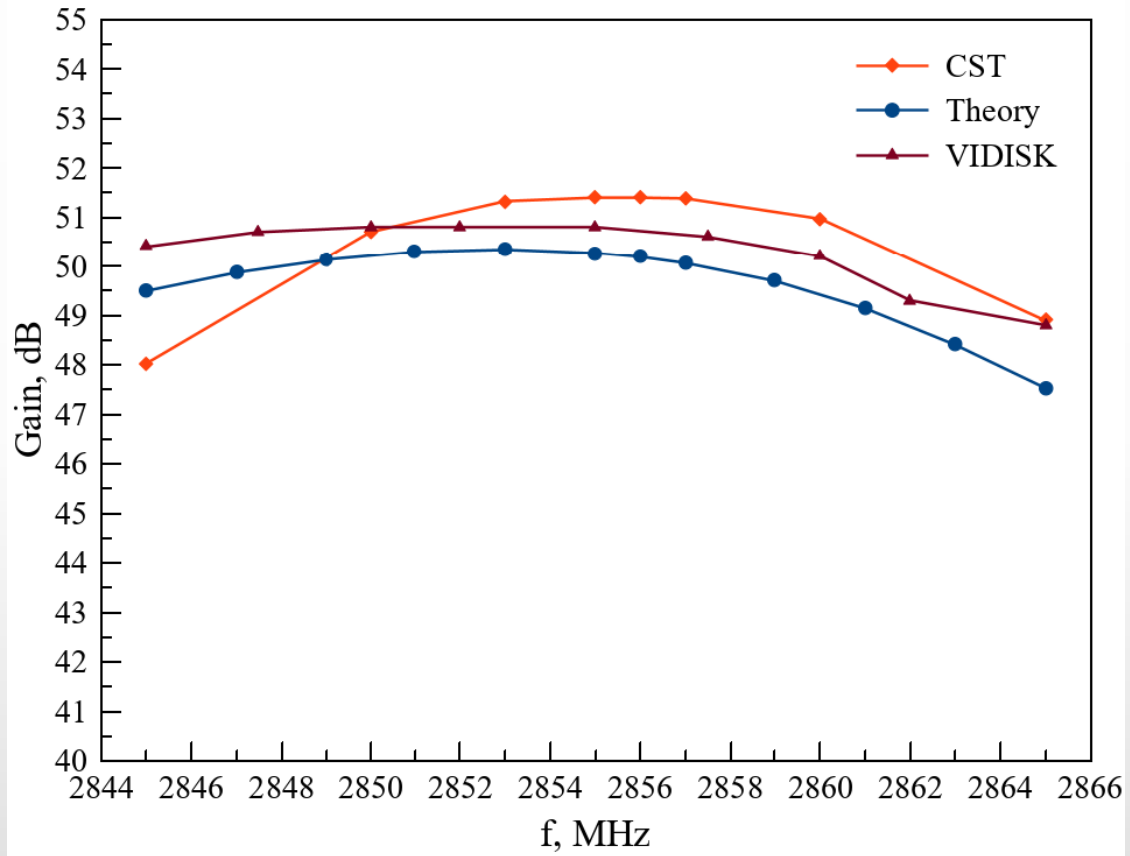
$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \omega_p^2 z = \eta E_{zc}$$

$$\frac{\partial^2 v_{\sim}}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 v_{\sim}}{\partial t \partial z} + \left(\frac{\partial v_{\sim}}{\partial t} \right)^2 + v^2 \frac{\partial^2 v_{\sim}}{\partial t \partial z} + v \frac{\partial v_{\sim}}{\partial t} \frac{\partial v_{\sim}}{\partial z} + \omega_q^2 v_{\sim} = \frac{e}{m} \left(\frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial z} \right) E_{zc}$$

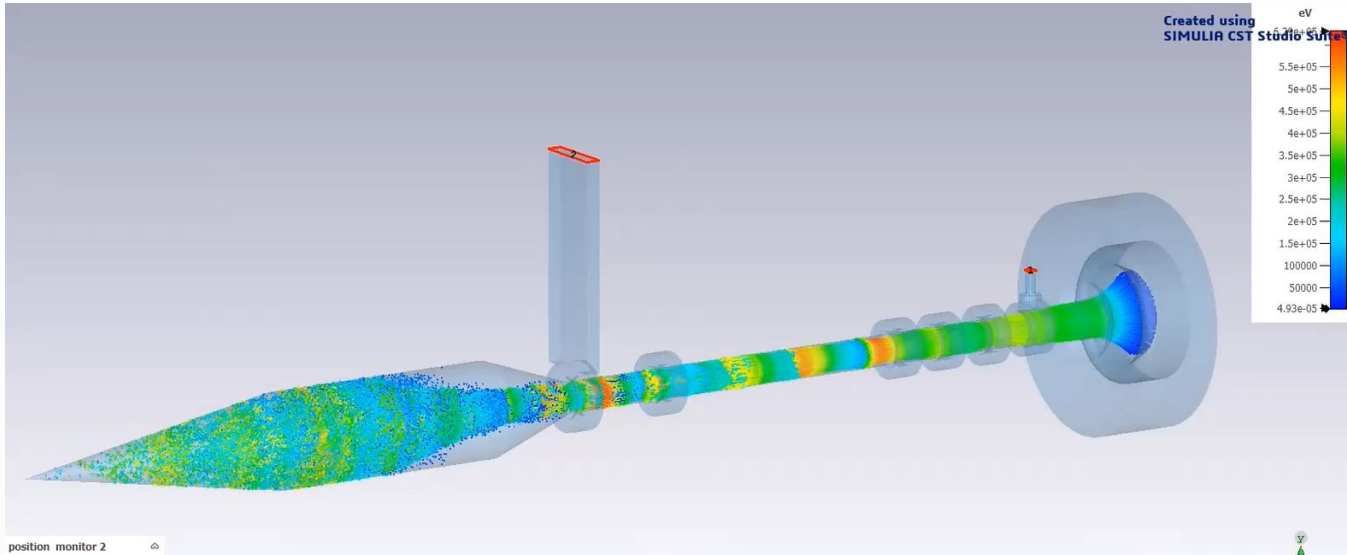
Полученное нелинейное уравнение в частных производных полностью поясняет нелинейный характер колебаний в электронном потоке.

Анализ клистрона связан с анализом представленного уравнения. В данном уравнении отсутствует информация о вакуумной камере, размере пучка, релятивизме пучка, нагрузке резонаторов и о многом другом. Однако, все перечисленные явления необходимо учесть при решении данного уравнения. Для этого всегда вводятся некоторые допущения и поправочные коэффициенты. В разной литературе подходы тоже разные. Все это приводит к значительным сложностям при анализе и расчете клистрона.

Моделирование группировки



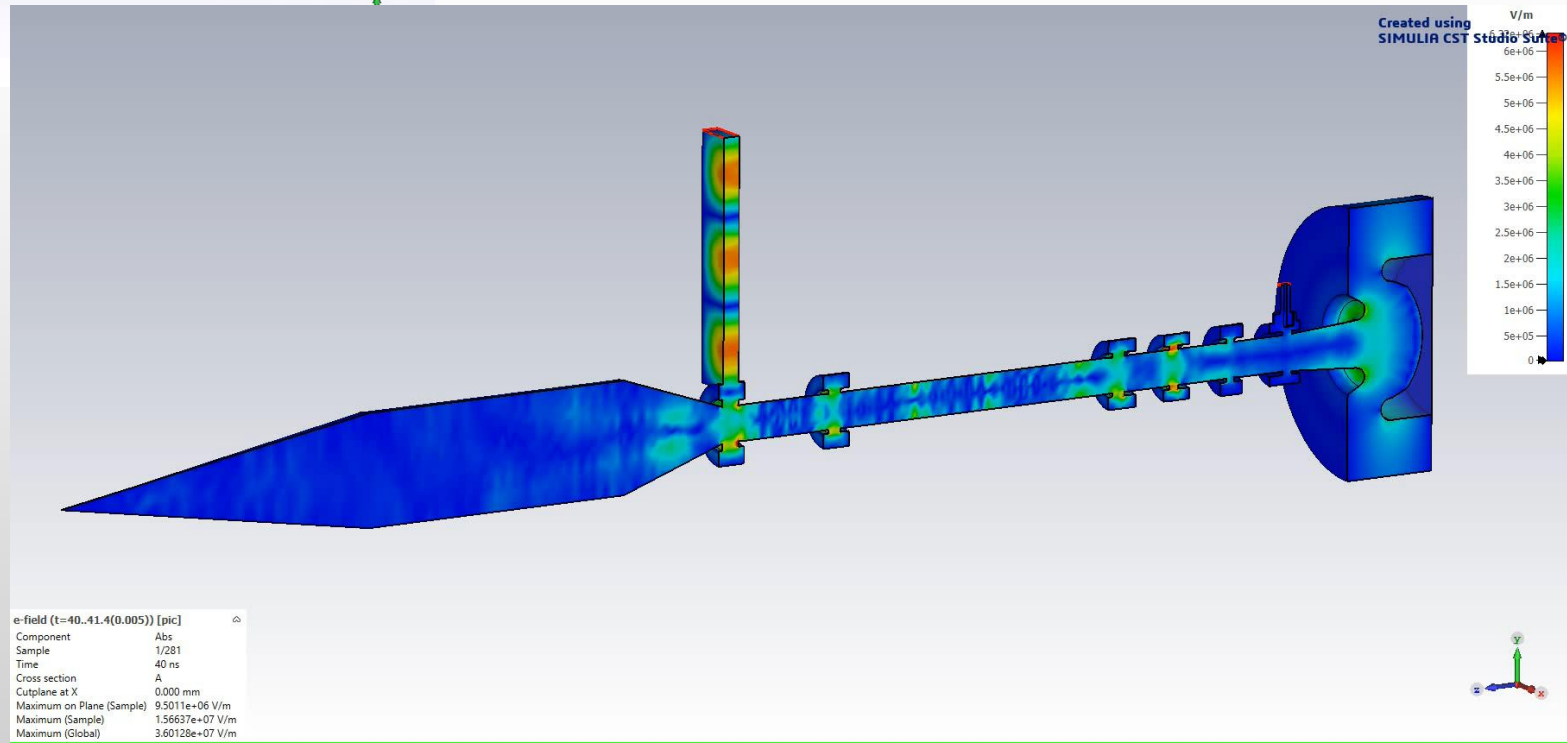
Моделирование группировки



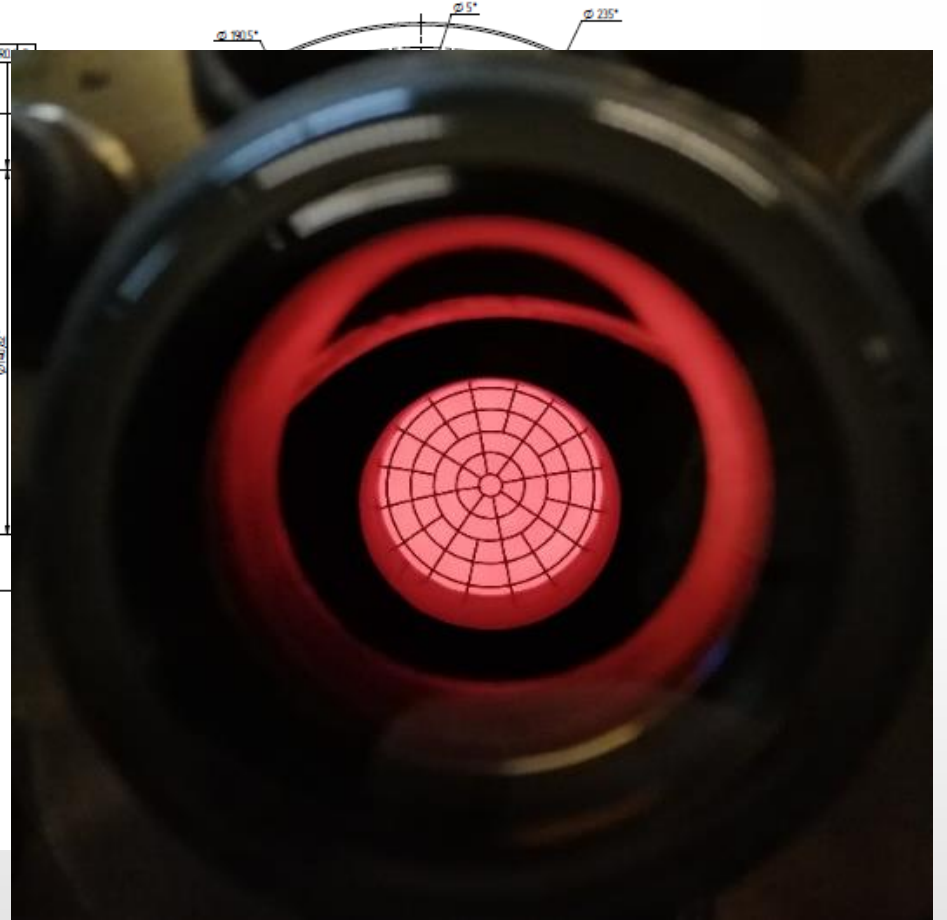
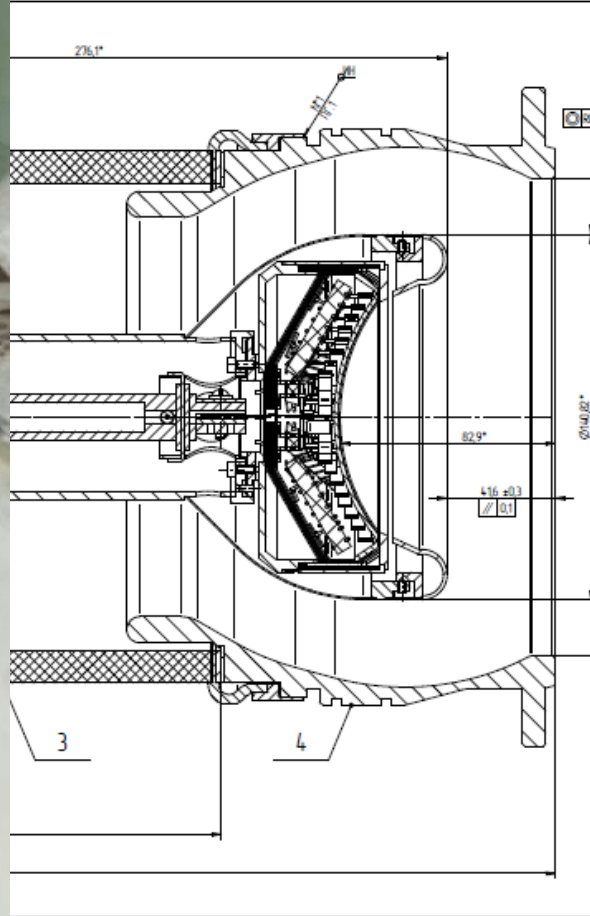
$$I = I_0 \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n(n\chi) \cos(n\omega t - n\theta_0) \right)$$

position_monitor_2

Output	Energy
Sample	1/281
Time	39.9998 ns
Particles	512041
Maximum (Sample)	604245 eV
Maximum (Global)	629331 eV



Катодный узел



Предварительные испытания катода

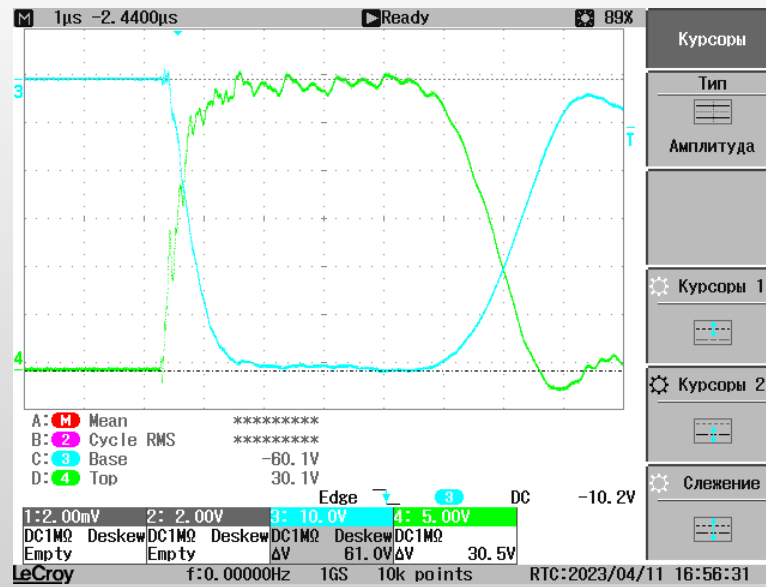
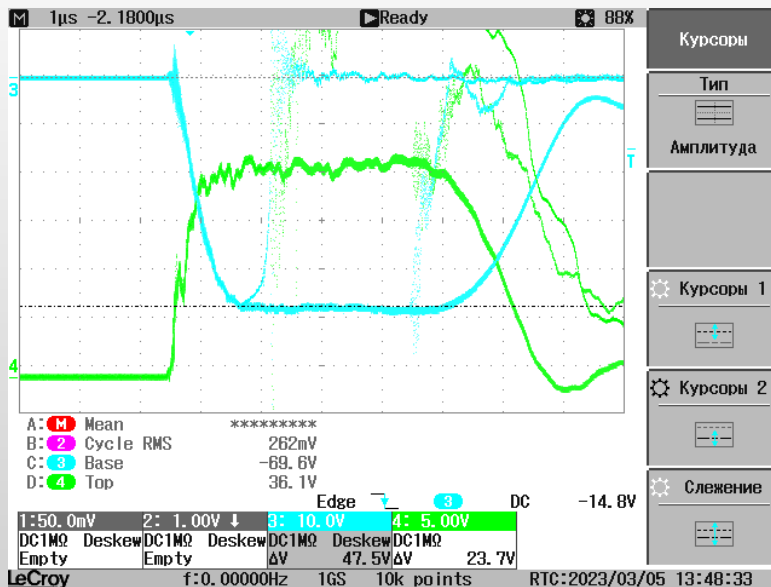
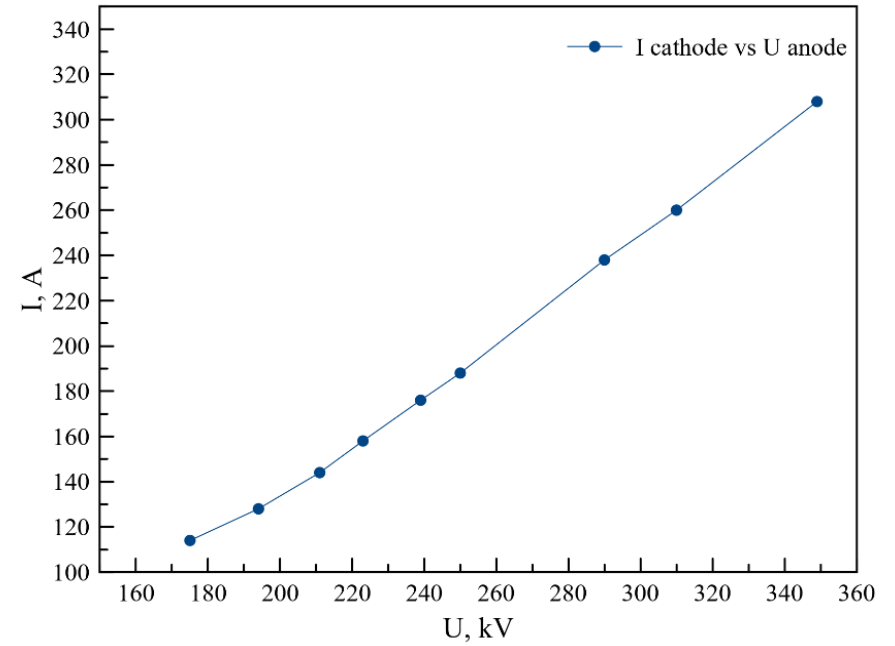
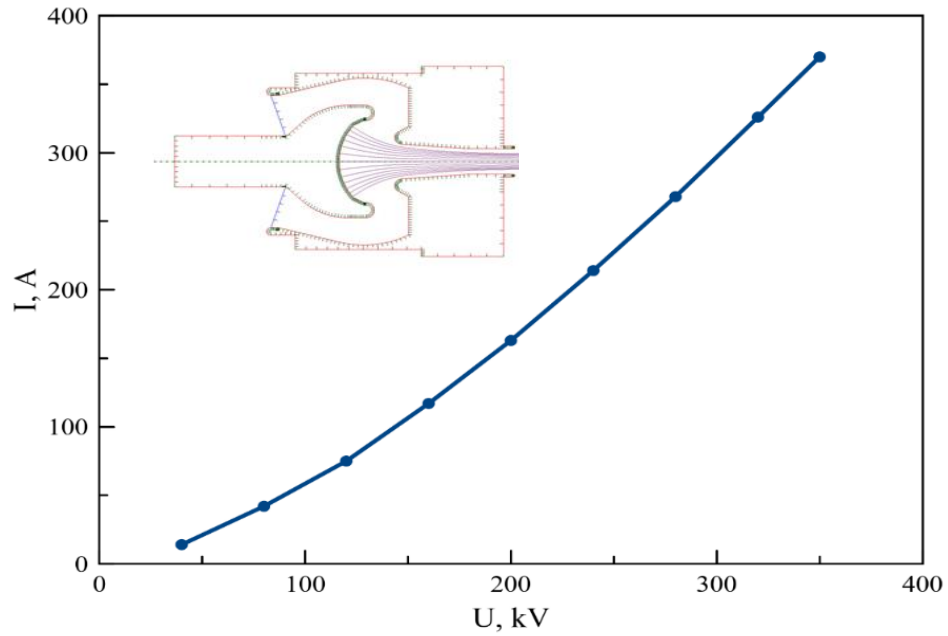
Сферический диспенсерный катод, диаметр в районе 90 мм.

Ожидаемый ток эмиссии 350 А

Накал 700 Вт

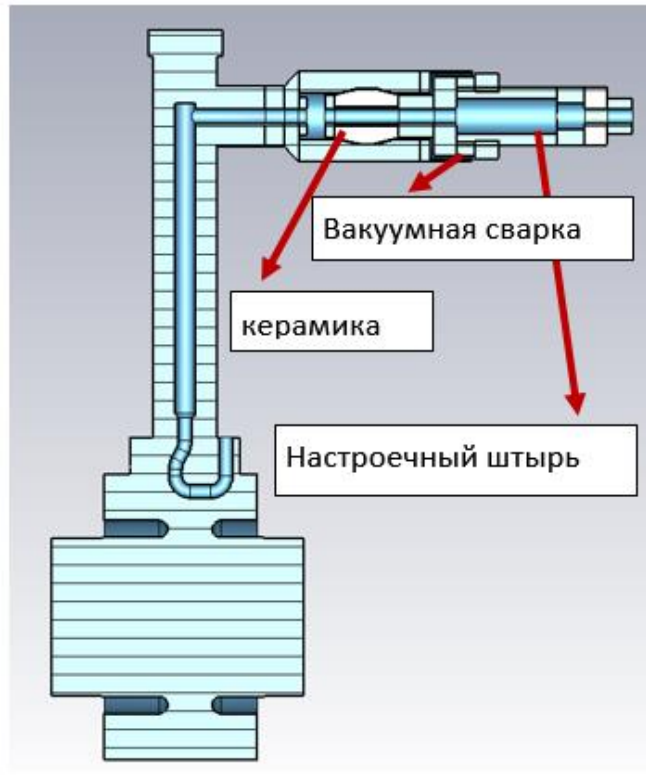
Температура $\sim 1070^{\circ}\text{C}$

Измерения тока эмиссии



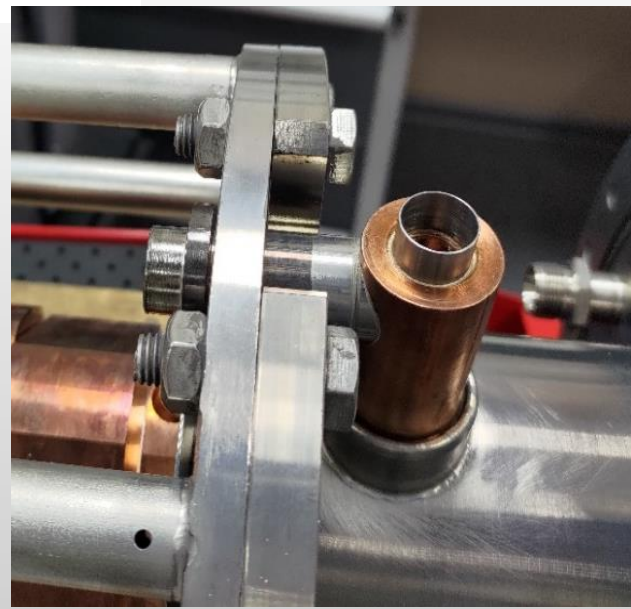
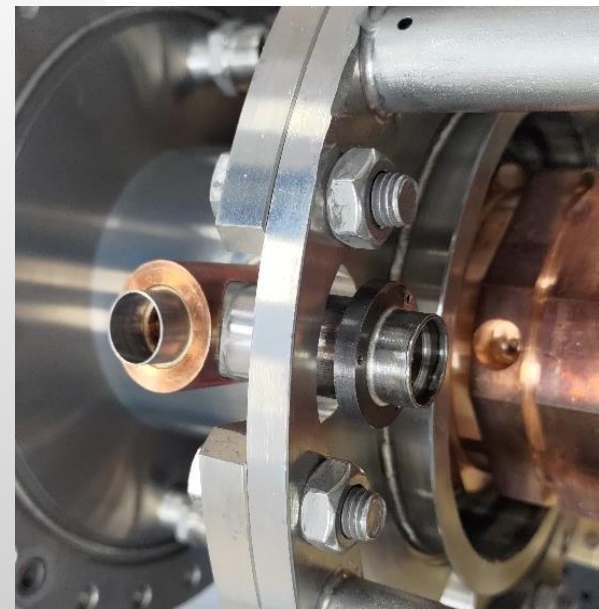
Напряжение (голубой график) 350 кВ, ток (зеленый) 310 А, микроперванс $1.5 \text{ A/V}^{3/2}$

Входной резонатор



Входной резонатор имеет петлю ввода СВЧ мощности с вакуумной керамической развязкой. Особенности резонатора:

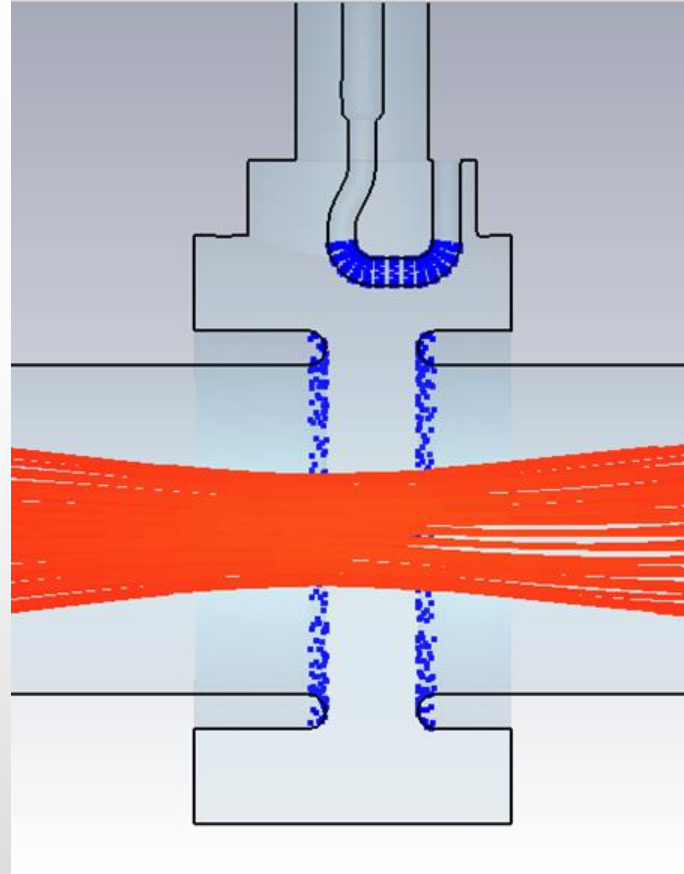
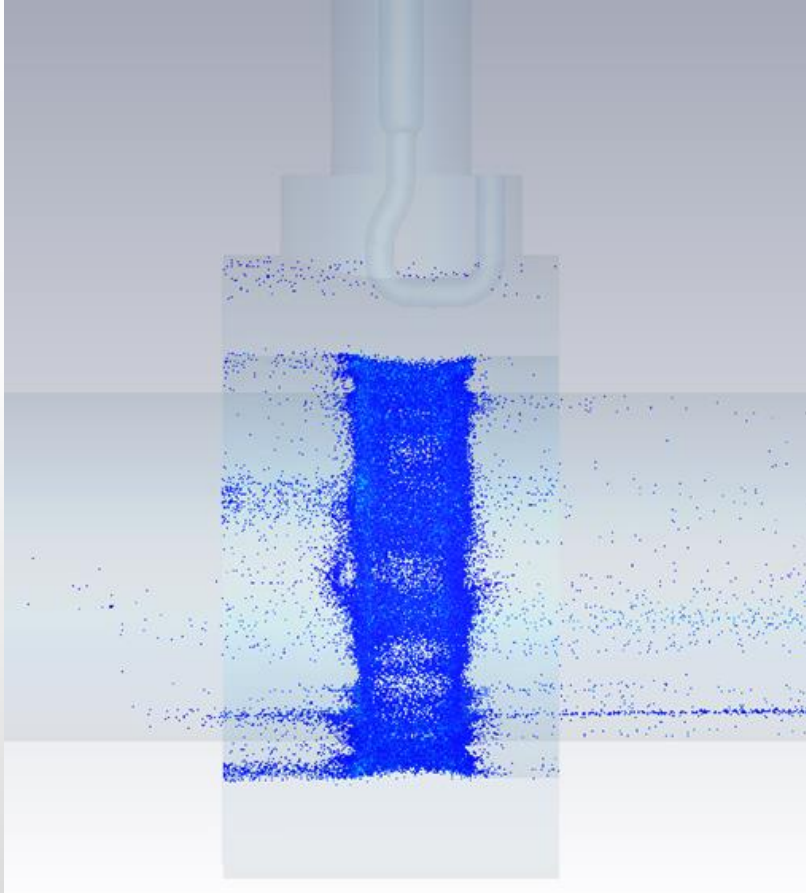
- Связь (уровень отражения) с внешним коаксиалом должна варьироваться после пайки клистрона.
- Сама петля ввода паяется и фиксируется.
- Качество вакуумной керамической развязки заранее неизвестно и должно компенсироваться внешней подстройкой
- Сама петля связи изменяет частоту более, чем на 10 МГц и зависит от пайки, то есть настройка частоты резонатора до пайки петли затруднительна.
- Пучок должен поглощать СВЧ мощность и вносит реактивную составляющую в резонатор, это нужно учитывать.



В итоге данный резонатор с элементом СВЧ ввода выполнен по сути в виде двух связанных резонаторов (сам резонатор и элемент ввода), когда связь второго резонатора обеспечивается внешней связью первого резонатора.

Входной резонатор

Отдельный анализ показал, что без пучка в магнитном поле может развиваться мультипактор, но пучок должен его «гасить».

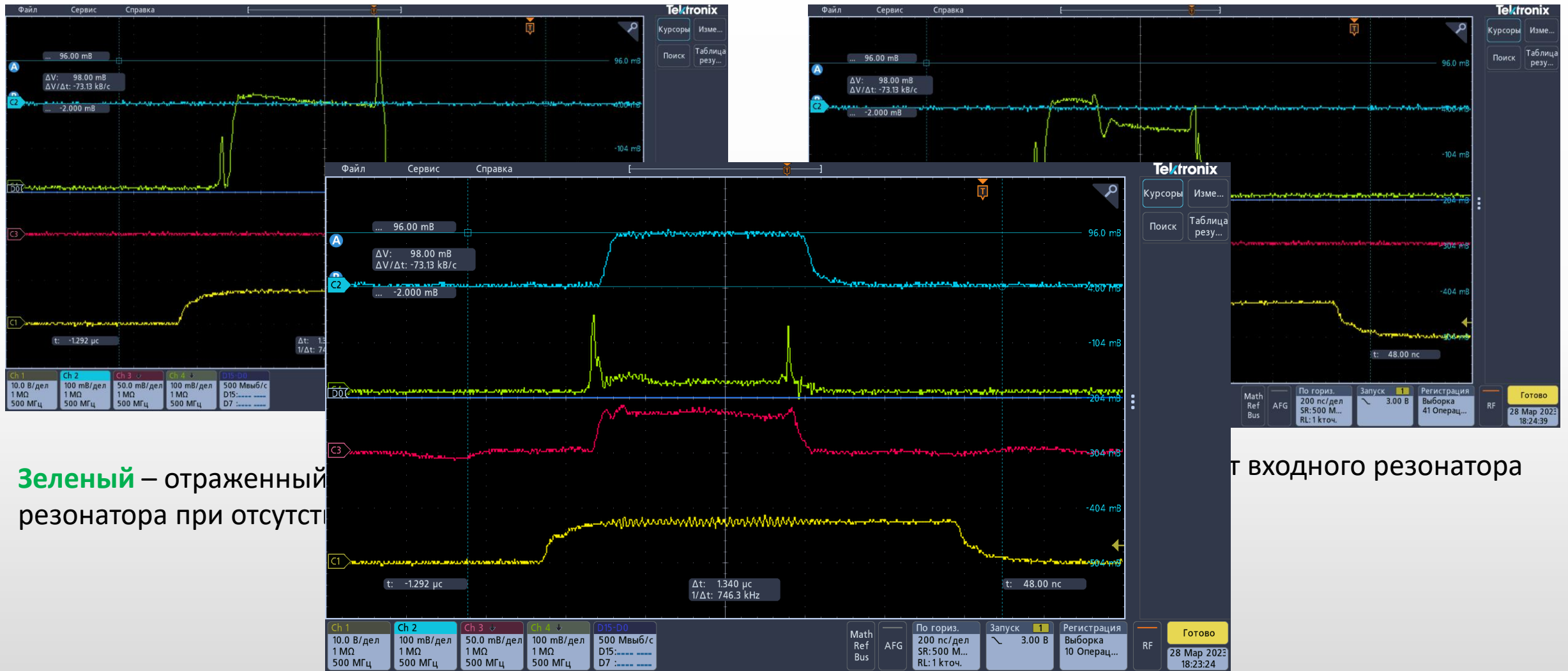


Параметры	Измеренные значения
Частота	$f_0 = 2857$ МГц (на воздухе)
Коэффициент связи	$\beta = 10$
Нагруженная добротность	$Q_L = 240$
Собственная добротность	$Q_0 = 2640$
Внешняя добротность	$Q_e = 264$

Вторично-эмиссионный резонансный разряд (мультипактор) без пучка

Вторично-эмиссионный резонансный разряд (мультипактор) с пучком практически не развивается

Входной резонатор

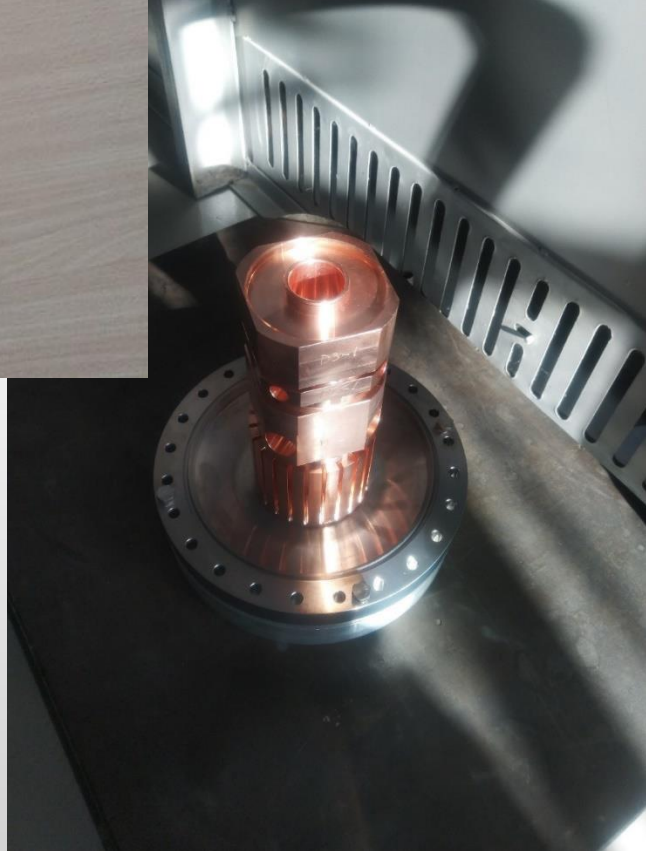
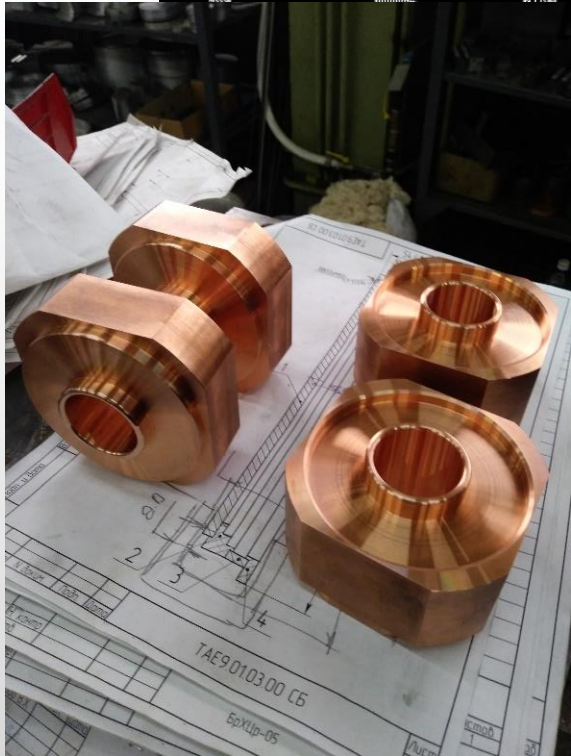
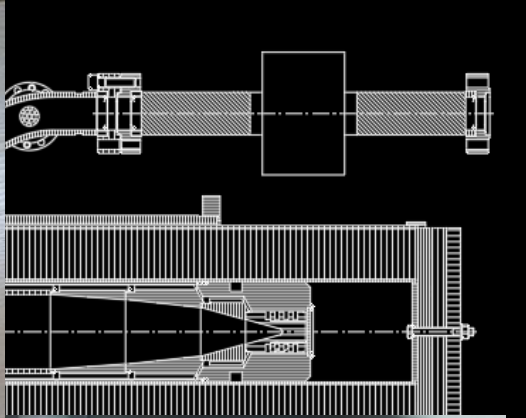
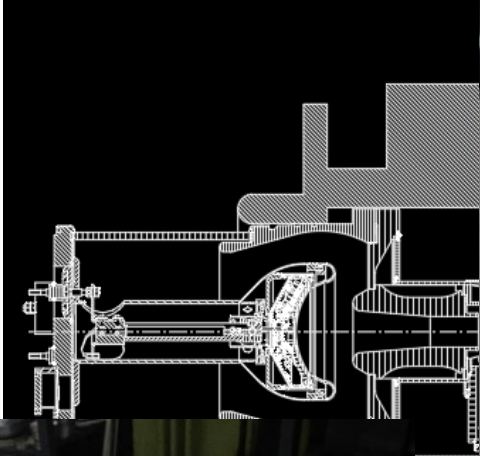


Зеленый – отраженный сигнал от входного резонатора при отсутствии тока пучка

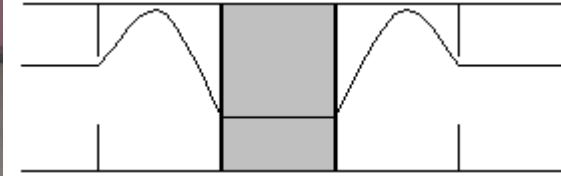
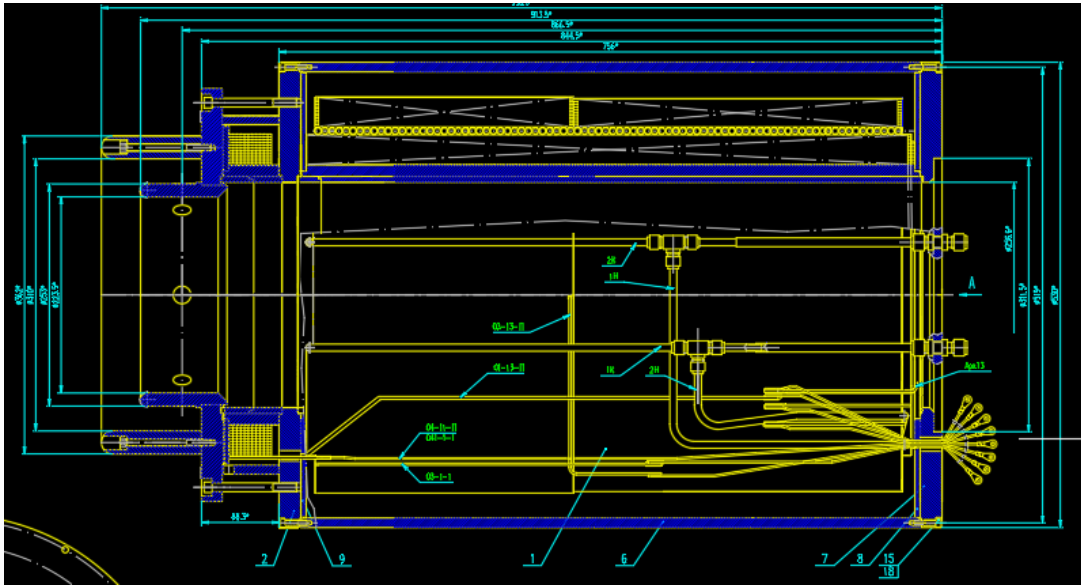
т входного резонатора

Зеленый – отраженный сигнал от входного пучка при токе пучка в районе 310 А

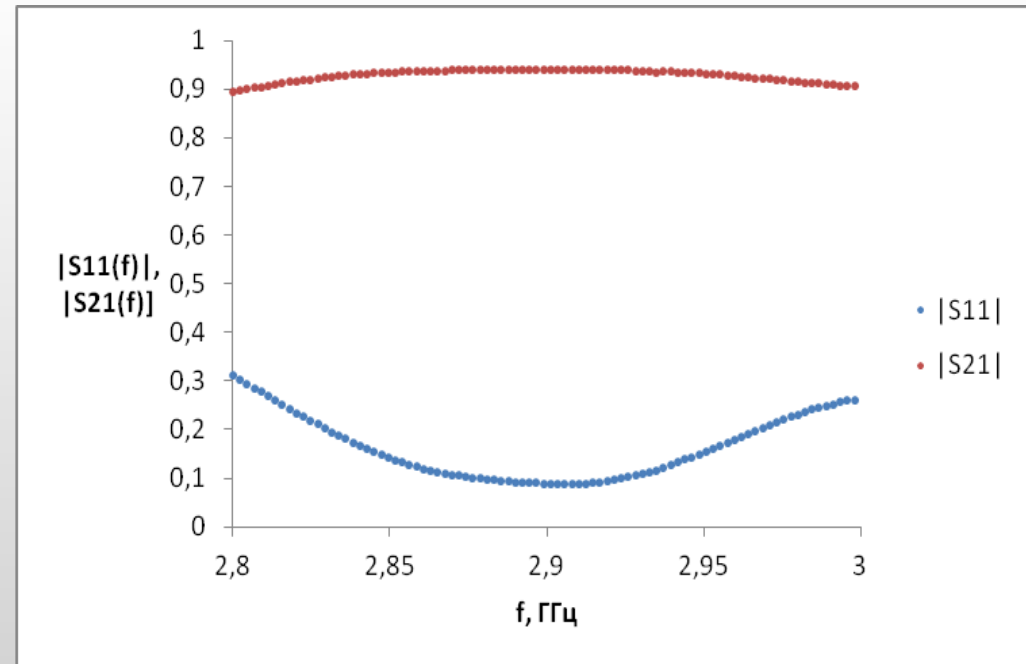
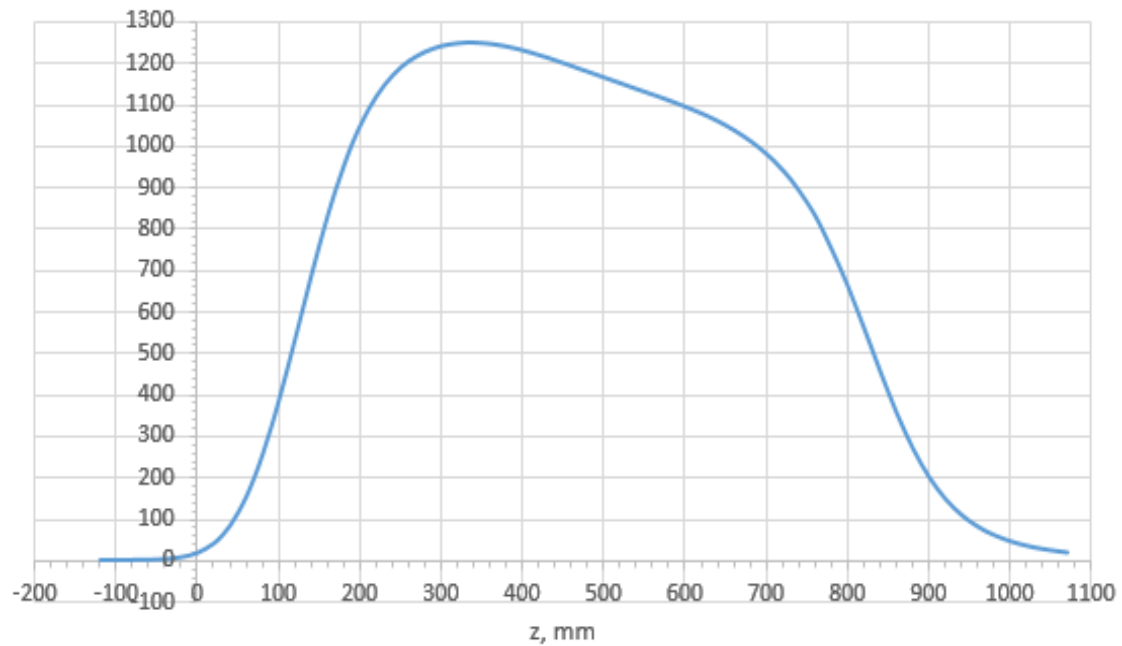
Группирующие резонаторы



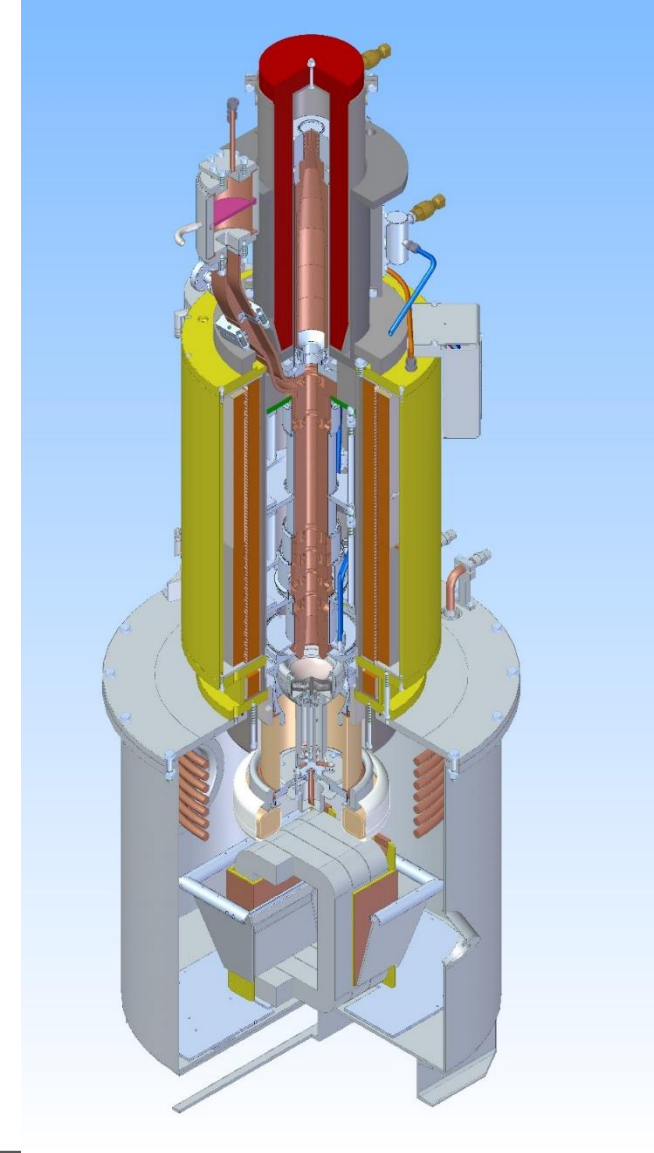
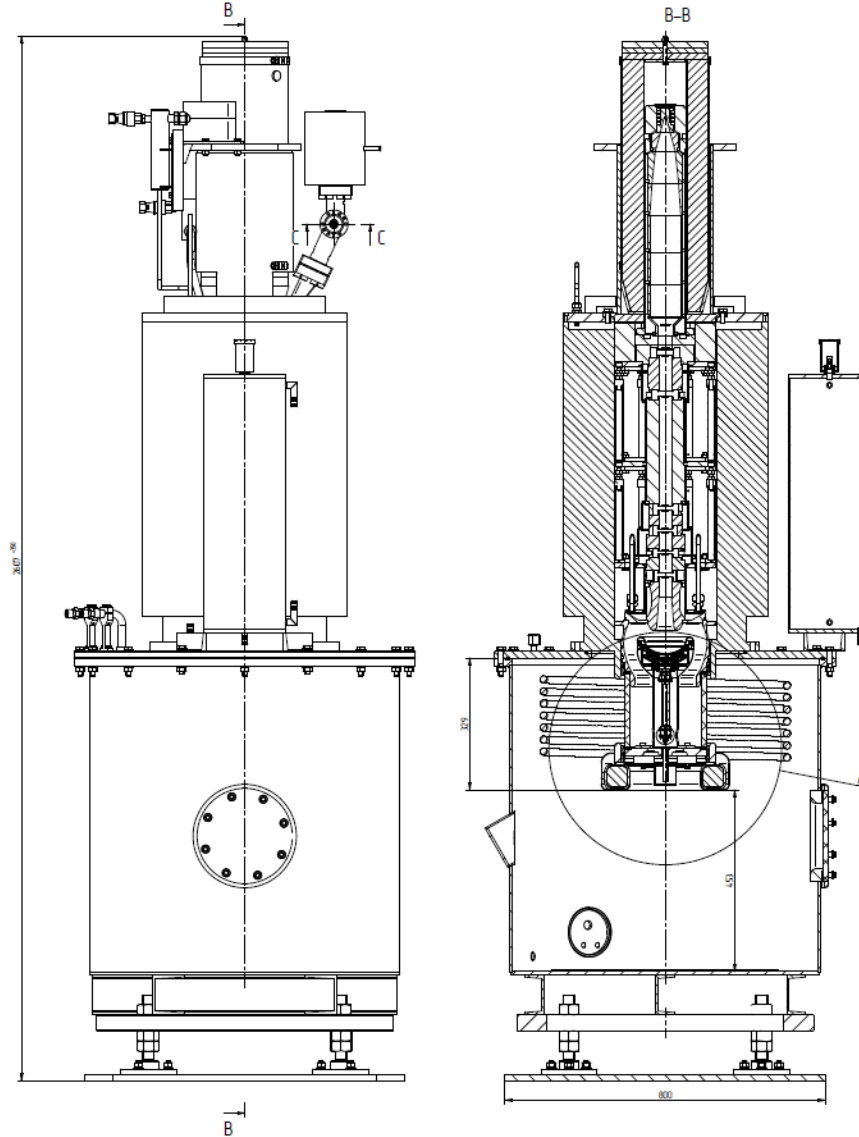
Соленоид и волноводное СВЧ окно



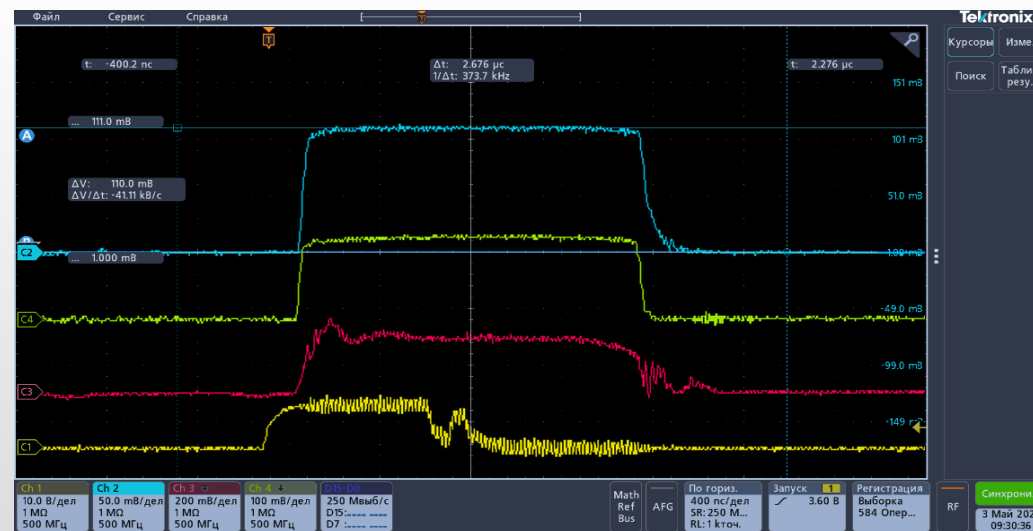
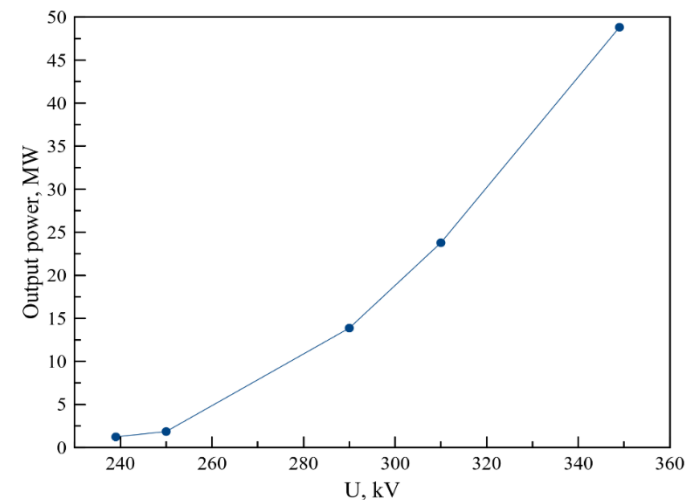
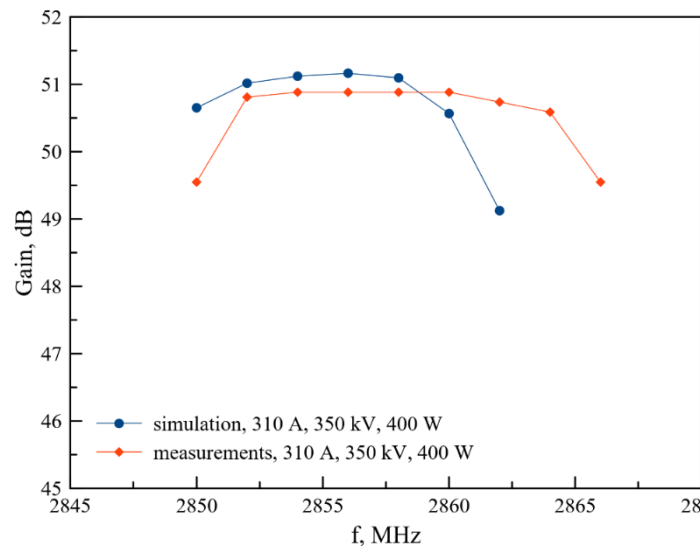
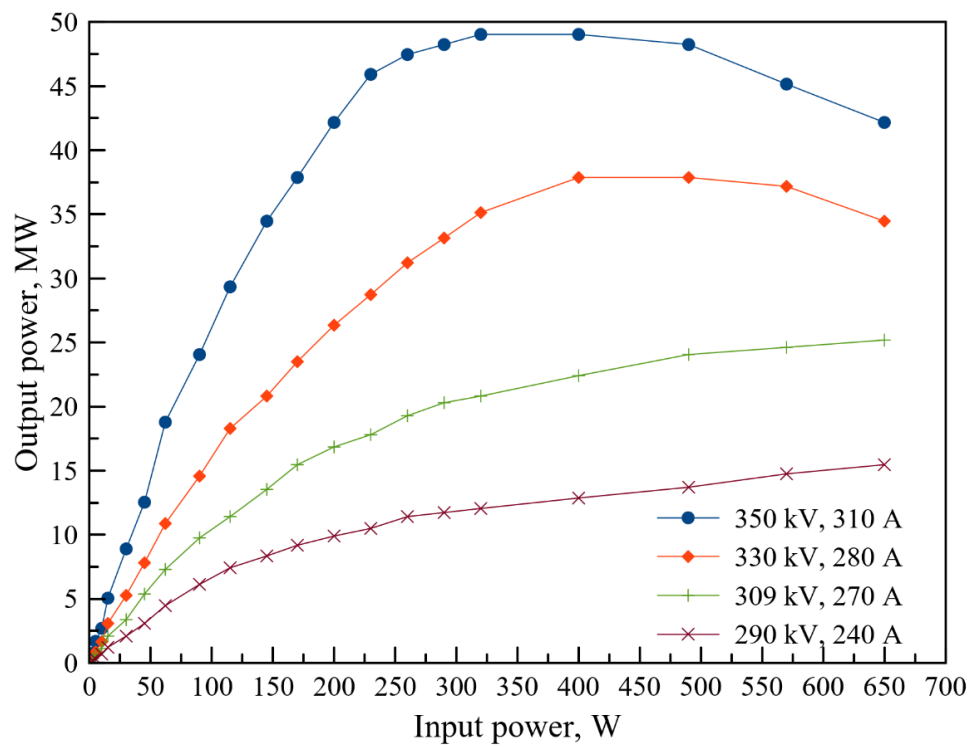
$B(z), \text{Gs}$



Клистрон на стенде



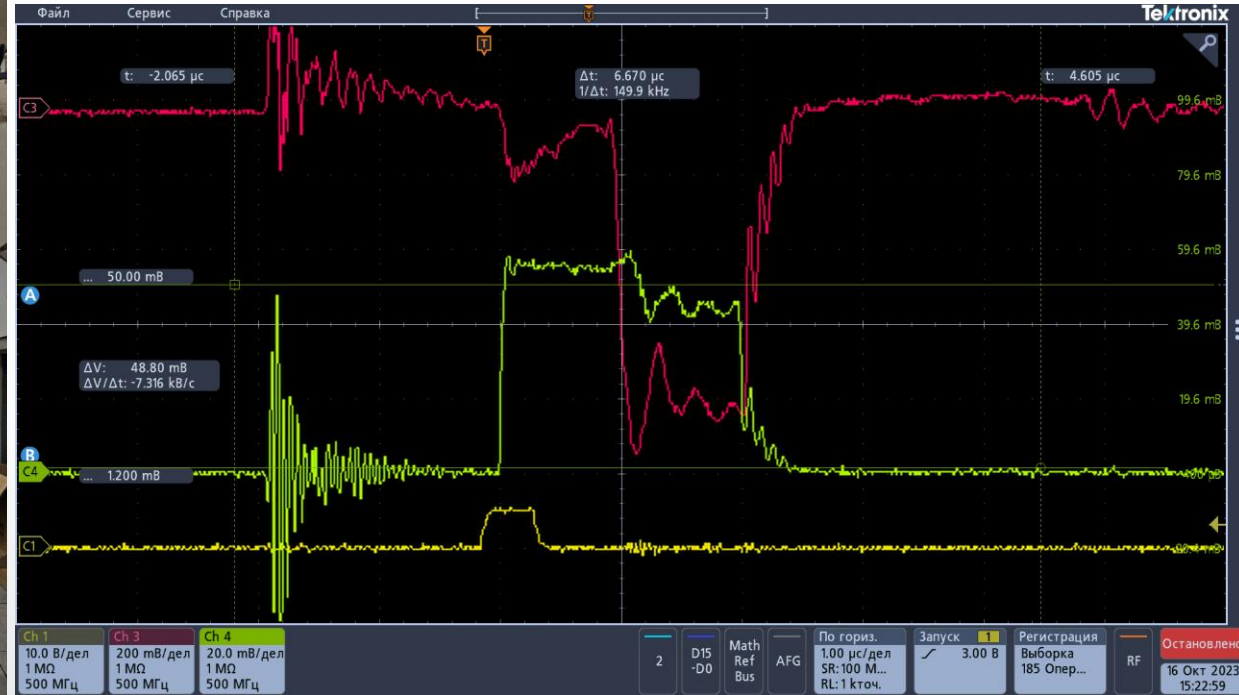
Результаты



Параметры	Значение
Частота	2856±4 МГц
Выходная импульсная мощность	50±4 МВт
Входная мощность	350 Вт
Длительность СВЧ импульса	1.5 мкс
Частота повторения	до 5 Гц
Ток пучка	310 А
Высокое напряжение анода	350 кВ

1 (желтый) – импульс запуска, 2 (синий) - огибающая СВЧ мощности, поступающая в нагрузку из клистрона, 3 (красный) – огибающая СВЧ импульса отраженного в клистрон сигнала перед волноводным вакуумным СВЧ окном, 4 (зеленый) - огибающая выходной СВЧ мощности перед волноводным вакуумным СВЧ окном

Нынешнее состояние. КЛЕН



Клистрон-III, второй экземпляр



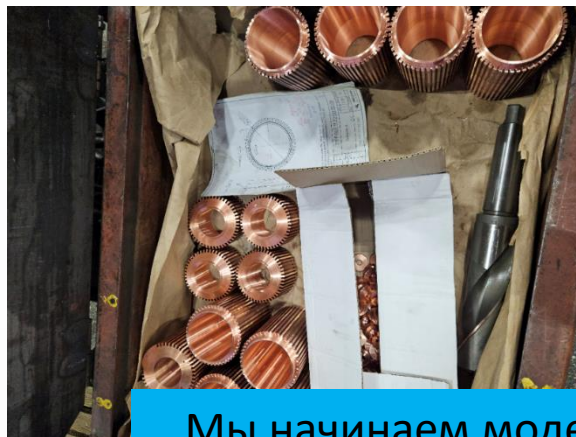
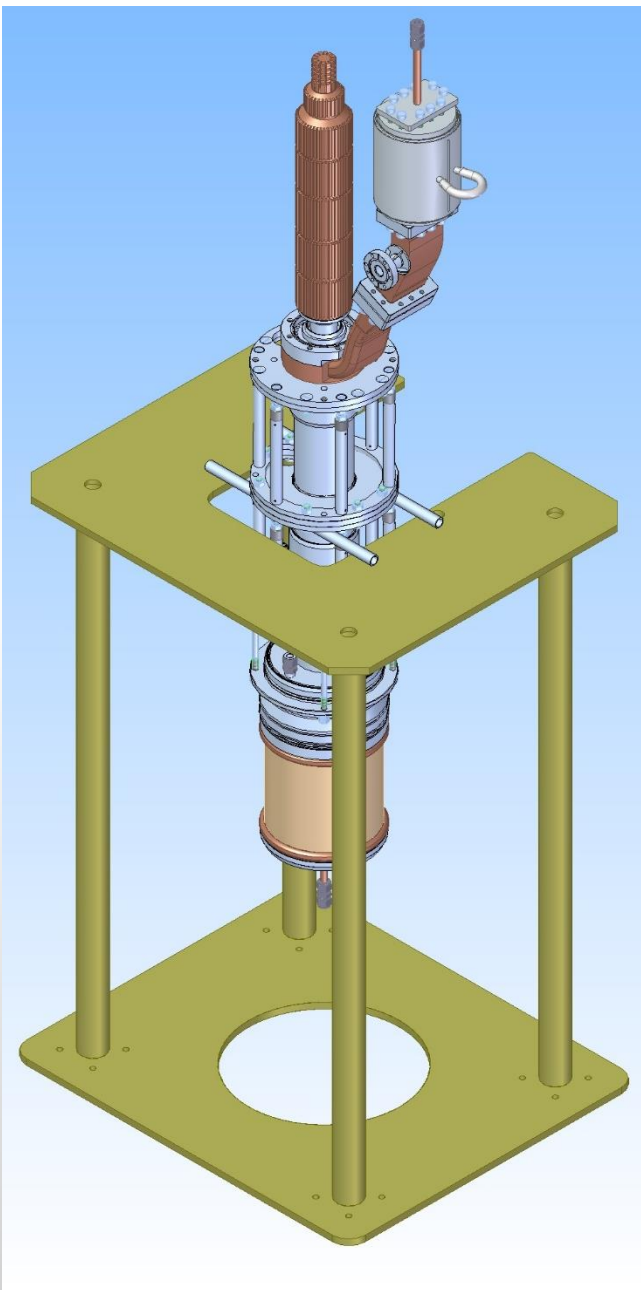
Пятый клистрон 5045 ВЭПП-5



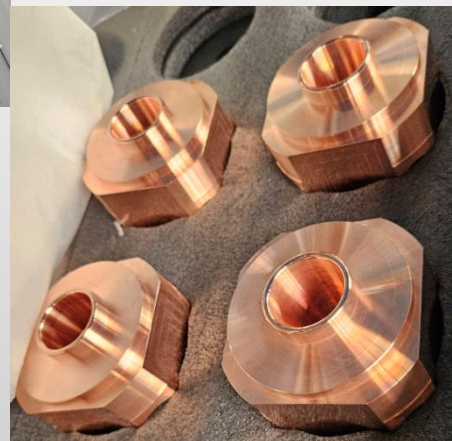
У клистрона заменены СВЧ окна на аналогичные, но разработки ИЯФ. Сейчас тренируется высокое напряжение (~250 кВ на данный момент). Скоро планируем подавать СВЧ мощность.

Необходимо для ВЭПП-5 изготавливать новые возбуждающие усилители!

Клистроны СКИФ



Мы начинаем моделирование клистрона на 5712 МГц с выходной мощностью 50 МВт в рамках ФНТП развития синхротронных и нейтронных исследований



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ