

Инжекторы

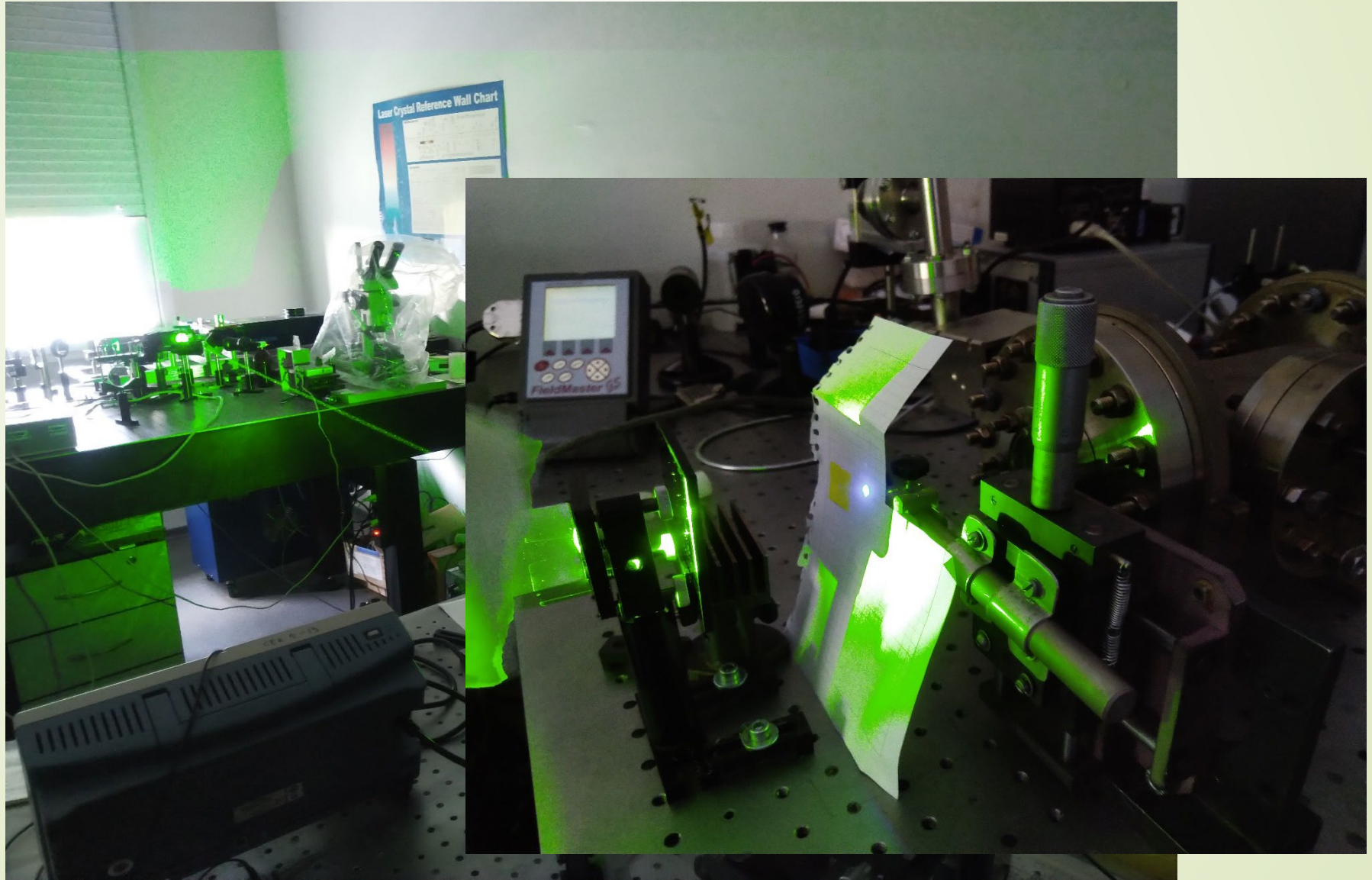
Научная сессия ИЯФ 2023

А.Е. Левичев
Сектор 5-13

A.E.Levichev@inp.nsk.su
03.03.2023

Источники электронов: разработка фотокатодов для получения интенсивных пучков

В 2022 году были продолжены работы с Институтом автоматизации и электрометрии с лазерным стендом с длиной волны 266 нм



Источники электронов: исследование фотокатода на основе IrCe

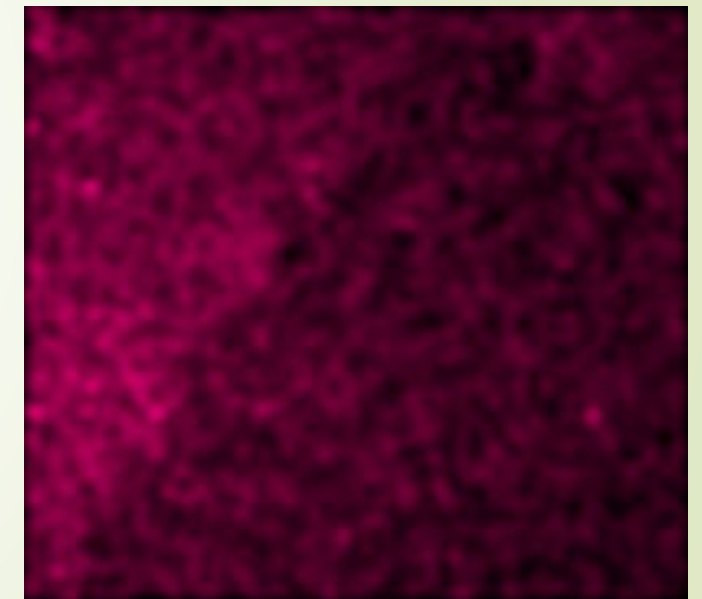
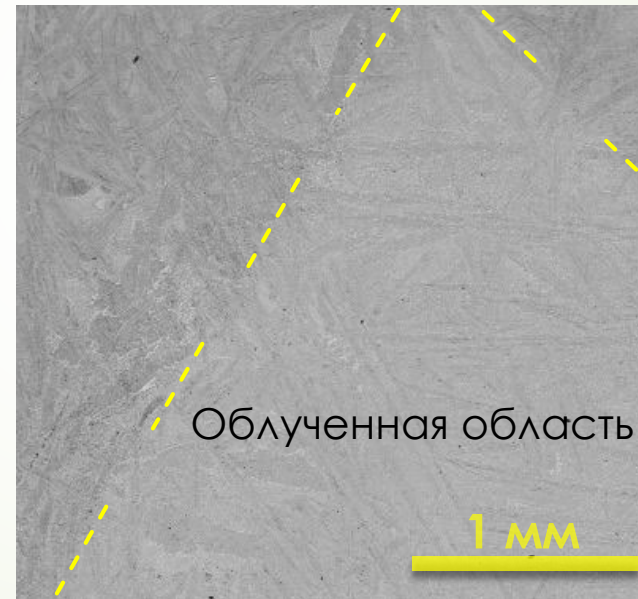
Катоды на основе IrCe являются перспективными фотокатодами благодаря достаточному квантовому выходу и высокому порогу абляции, что существенно увеличивает время жизни



Фотокатод был облучен импульсами лазера с плотностью энергии $19.4 \frac{\text{мДж}}{\text{см}^2}$, количество импульсов составило $1.8 \cdot 10^4$. После лазерной очистки наблюдался выраженный эффект изменения квантовой эффективности. При энергии лазерного импульса 38 мкДж и напряжении 5 кВ квантовая эффективность увеличилась на порядок с $6,27 \cdot 10^{-6}$ до $7,69 \cdot 10^{-5}$.

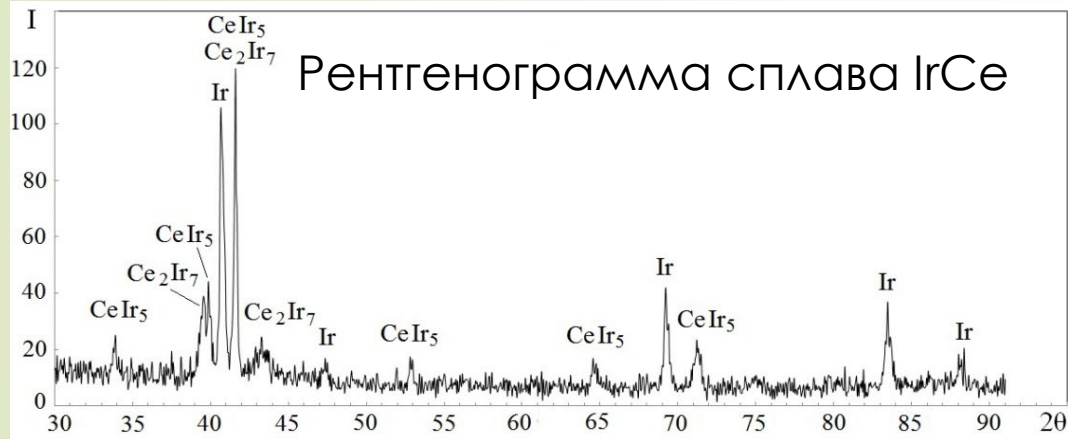
Образец катода

Распределение кислорода



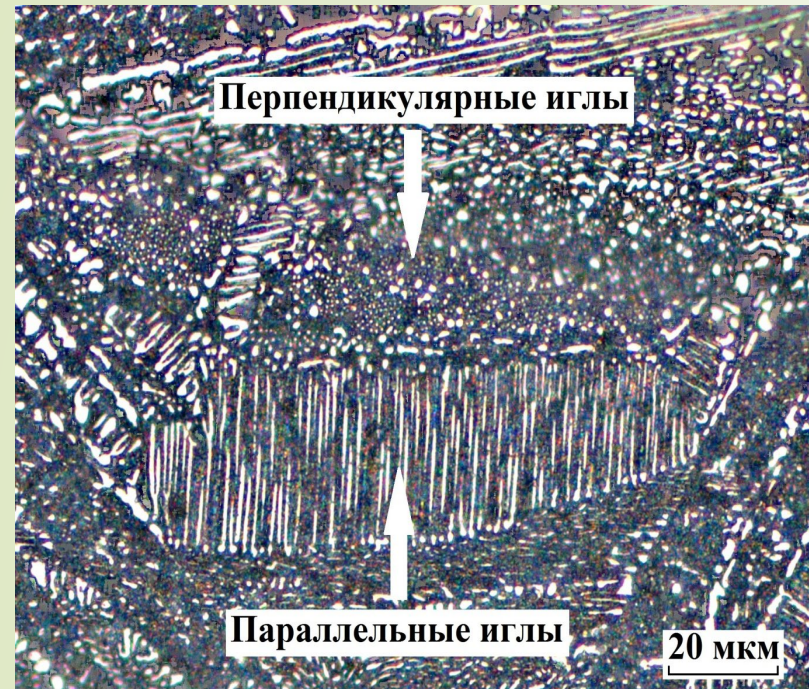
Облучение снизило количество оксидов на поверхности

Рентгенограмма сплава IrCe

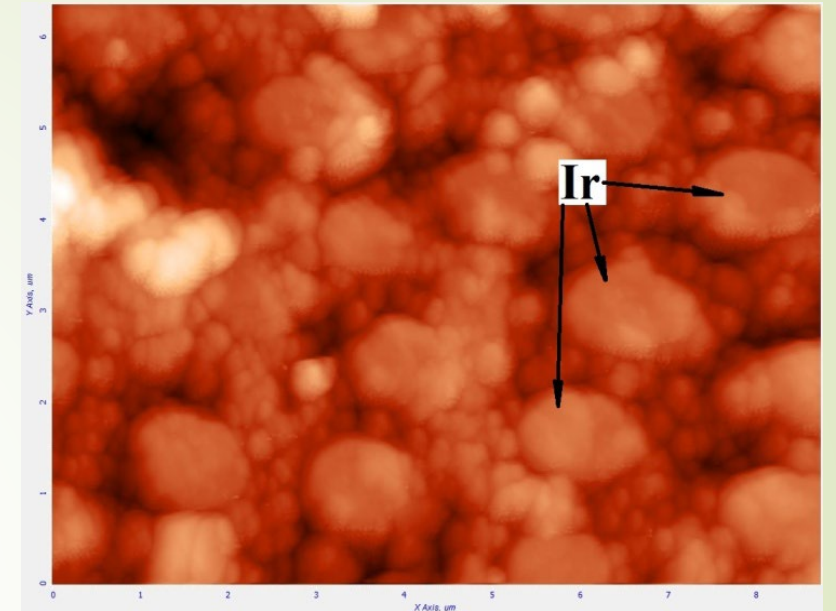


Таким образом, рентгенофазовый анализ показывает, что сплав IrCe не является однофазным, в нем присутствуют в значимых количествах три фазы - CeIr_5 , Ir и Ce_2Ir_7 .

Источники электронов: исследование фотокатода на основе IrCe



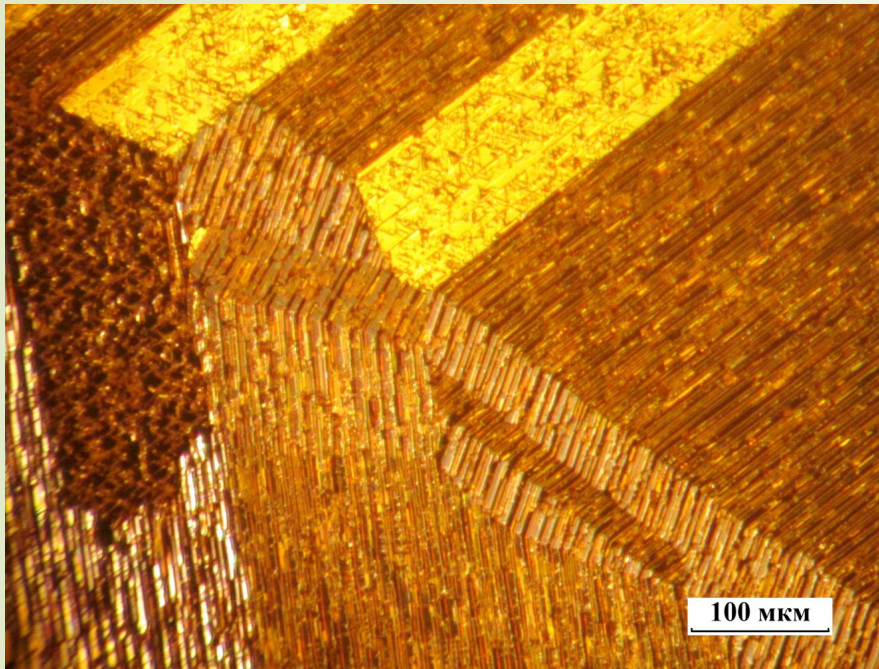
На рисунке зерна Ir с игольчатой эвтектикой, ориентированные перпендикулярно и параллельно поверхности фотокатода



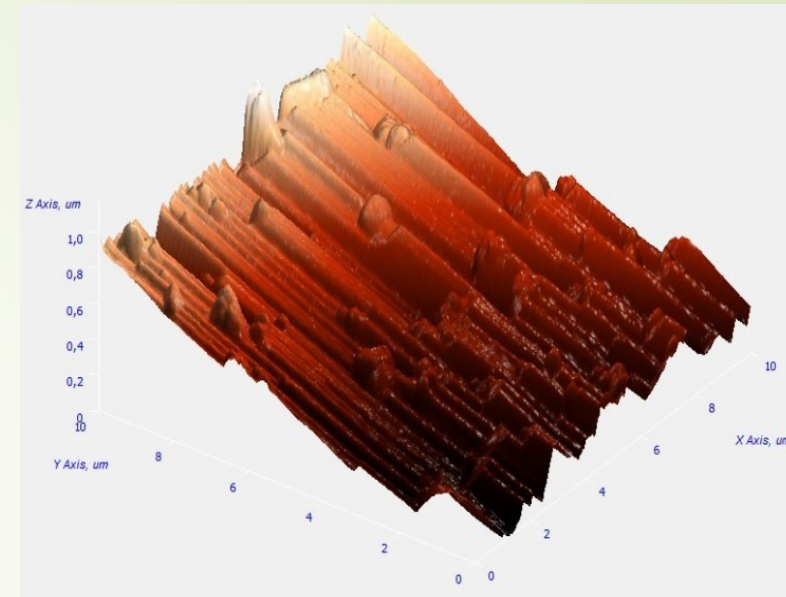
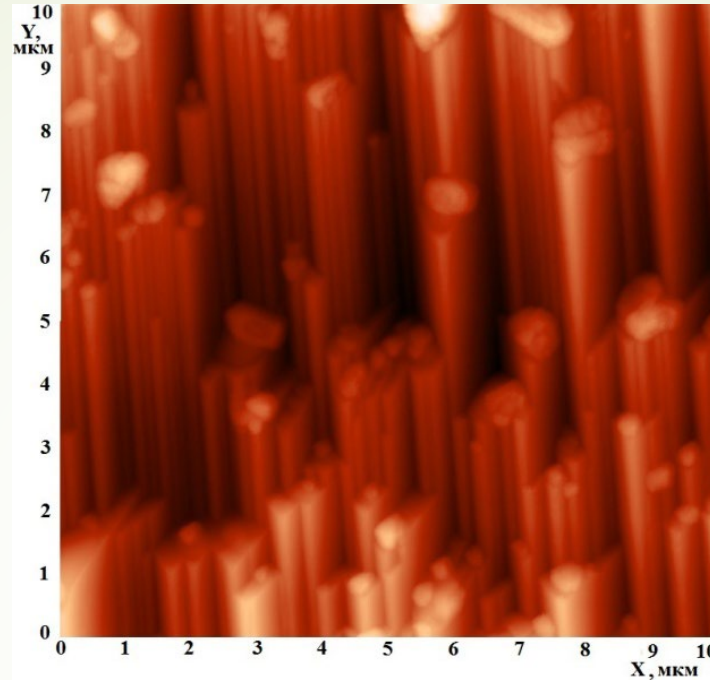
Атомно-силовая микроскопия эвтектики. 2D и 3D изображения

Малый размер кристаллов позволяет получить на поверхности методом электролитического травления игольчатые элементы Ir с радиусом кривизны около 400 нм и плотностью $\rho=33 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$. Наличие развитого рельефа поверхности катода приводит к увеличению фактической площади эмиссии электронов. Кроме того, вершины столбчатого рельефа обладают повышенной эмиссионной активностью и их высокая плотность может оказывать существенное влияние на эмиссионные свойства поверхности. Дисперсность структуры обеспечивает большую плотность межфазных границ. Оценка показывает, что на поверхности площадью 1 мм² длина сети межфазных границ составляет 0,83 м. Присутствие межфазных границ, в области которых существенно изменена симметрия решетки, может понизить работу выхода электронов и увеличить квантовую эффективность.

Источники электронов: исследование фотокатода на основе Cu



Поверхность меди после термического травления



Изображение рельефа поверхности, полученное методом атомно-силовой микроскопии. Слева двумерное, справа трехмерное изображение

При термическом травлении происходит образование ступенчатого рельефа на поверхности. Эмитирующая поверхность фотокатода складывается из участков разных граней монокристалла; разные грани имеют разную эмиссию. Также увеличивает эмиссию острые элементы рельефа. Термическое травление формирует рельеф в нанометровом диапазоне.

Лазерная система и оптический стол

В конце 2022 года была получена лазерная система и оптический стол для работы с фотокатодами и СВЧ фотопушкой.



Стол D



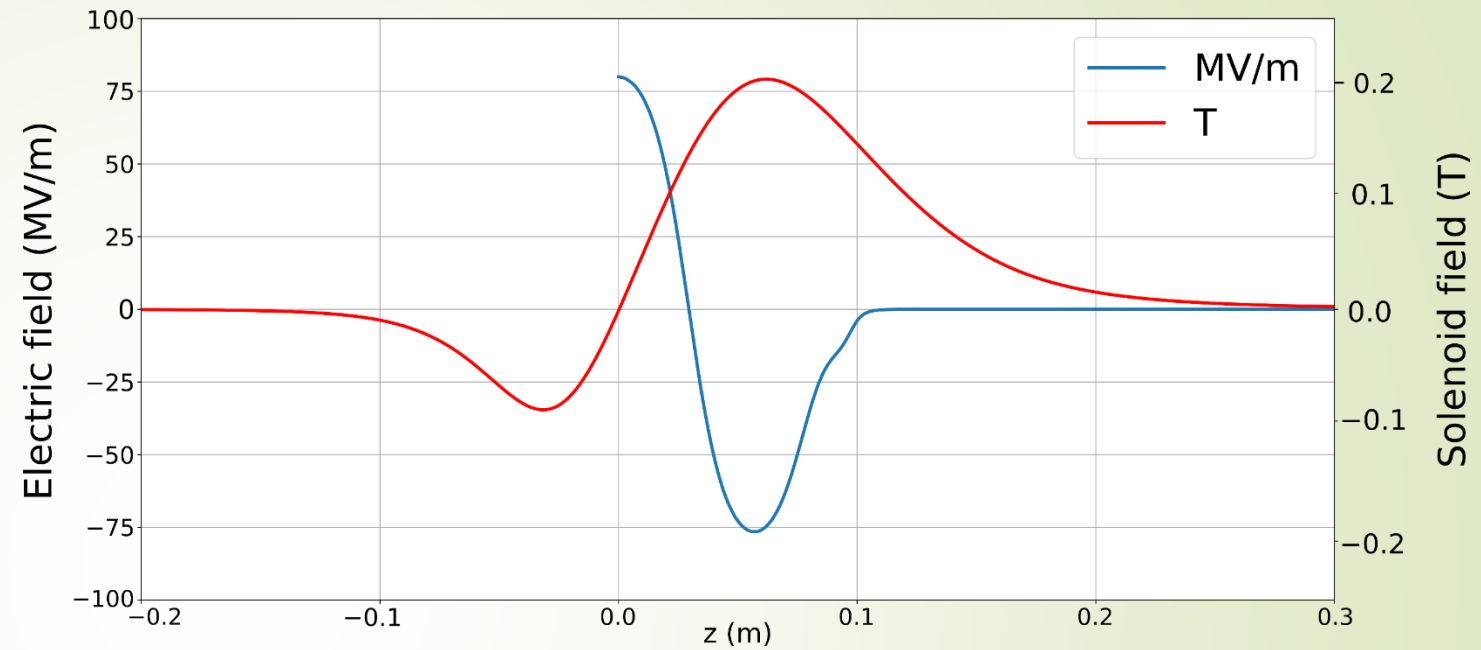
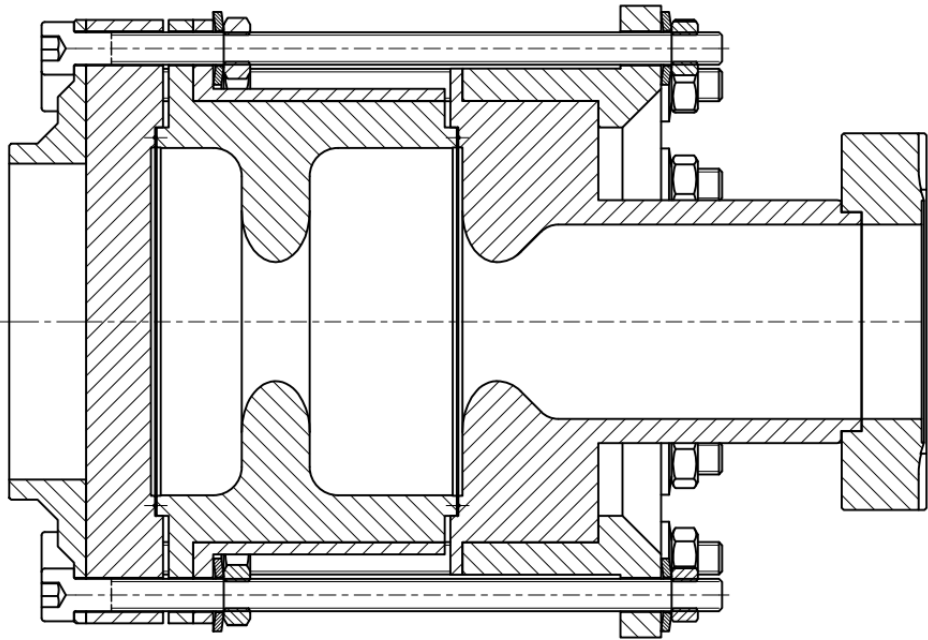
Наименование параметра

Значение

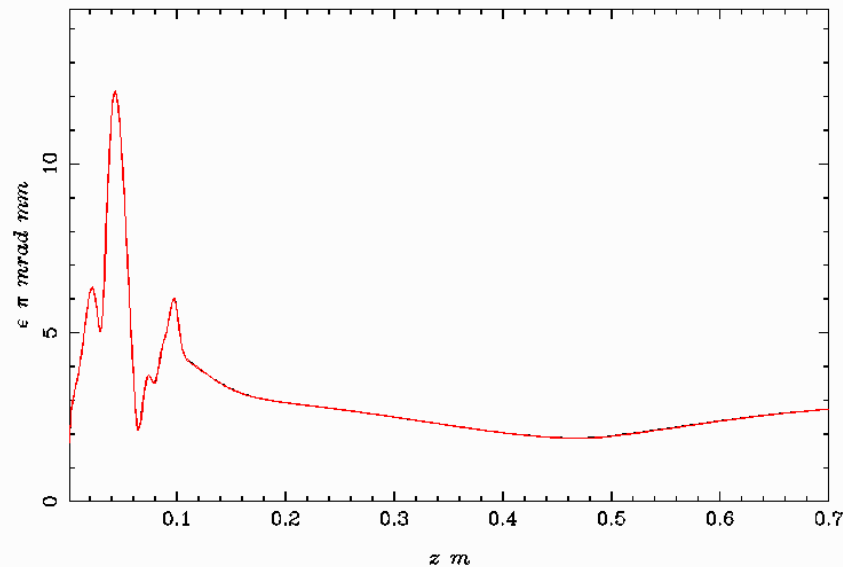
Наименование параметра	Значение
	1064 нм; 532 нм; 266 нм
	10 мДж
	10 Гц
	25 пс±2
	1%
	TEM00 ($M2 < 1.6$)
	100:1
по уровню	0,5 мрад
по луча на	20 мрад

рай)

Источники электронов: СВЧ фотопушка



Transverse Emittance



Поле на катоде 80 MV/m

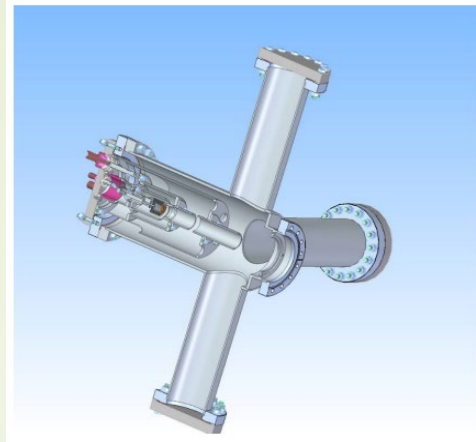
Заряд в сгустке 1.5 нКл

Энергия пучка 3.5 МэВ

Начато проектирование СВЧ фотопушки с фотокатодом с индиевым уплотнением. На данный момент продолжается конструкторская проработка

Источники электронов: разработка источника интенсивных электронных пучков кольцевого типа на основе электронной пушки с термокатодом

Электронная пушка с замагниченным катодом (разработана в ИЯФ СО РАН)

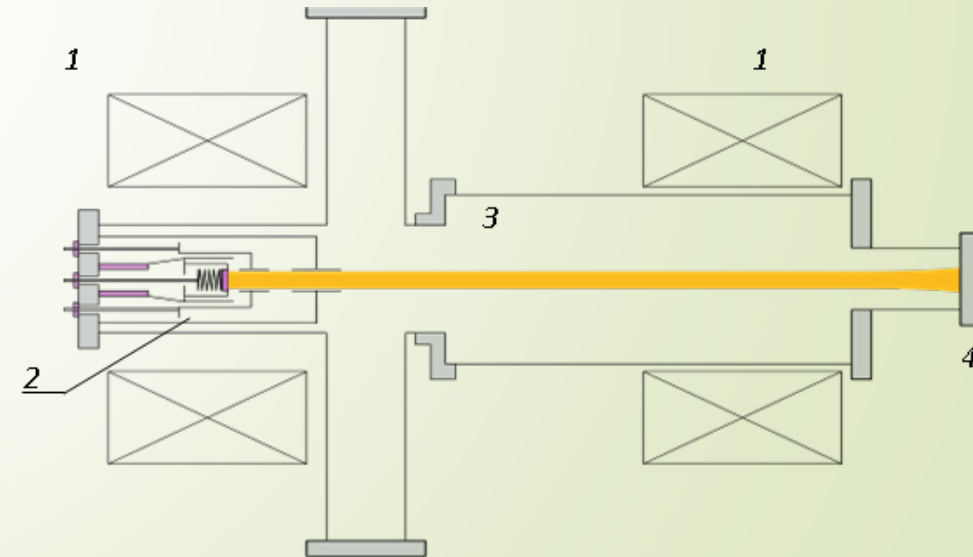


Кольцевая пушка необходима для исследований тепловых нагрузок различных материалов, применяемых в области термоядерного синтеза

Особенности :

- Пушка позволяет использовать практически всю номенклатуру катодных узлов, разработанную в ИЯФ СО РАН (LaV₆, Ir₅Ce).
- Выбор концепции с замагниченным пучком обусловлен простотой управления размером пучка на мишени и, соответственно, экспозиционной плотностью энергии.

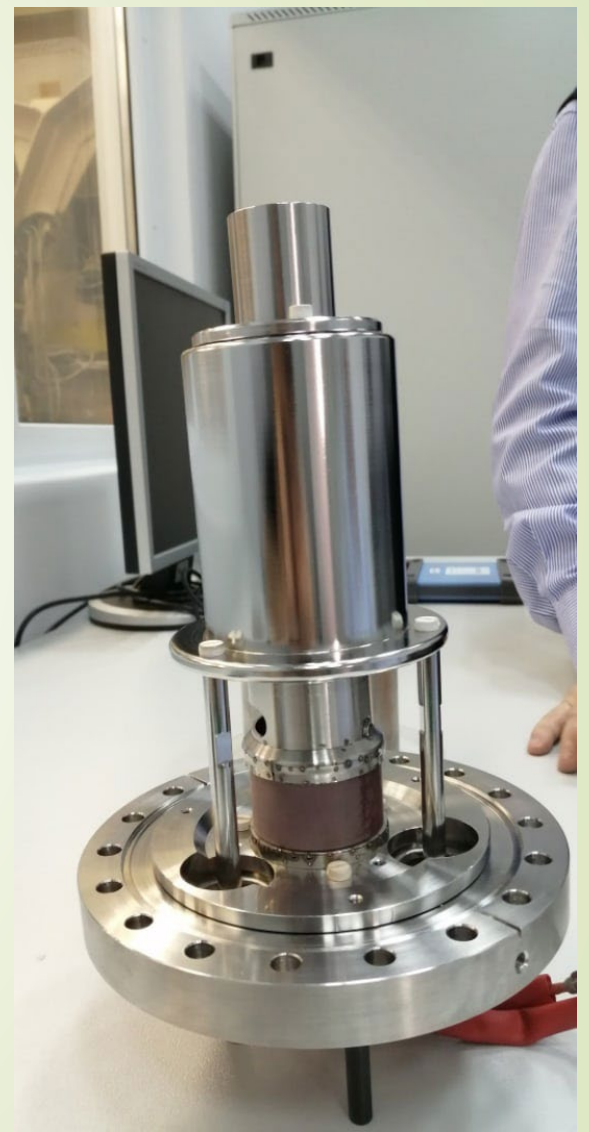
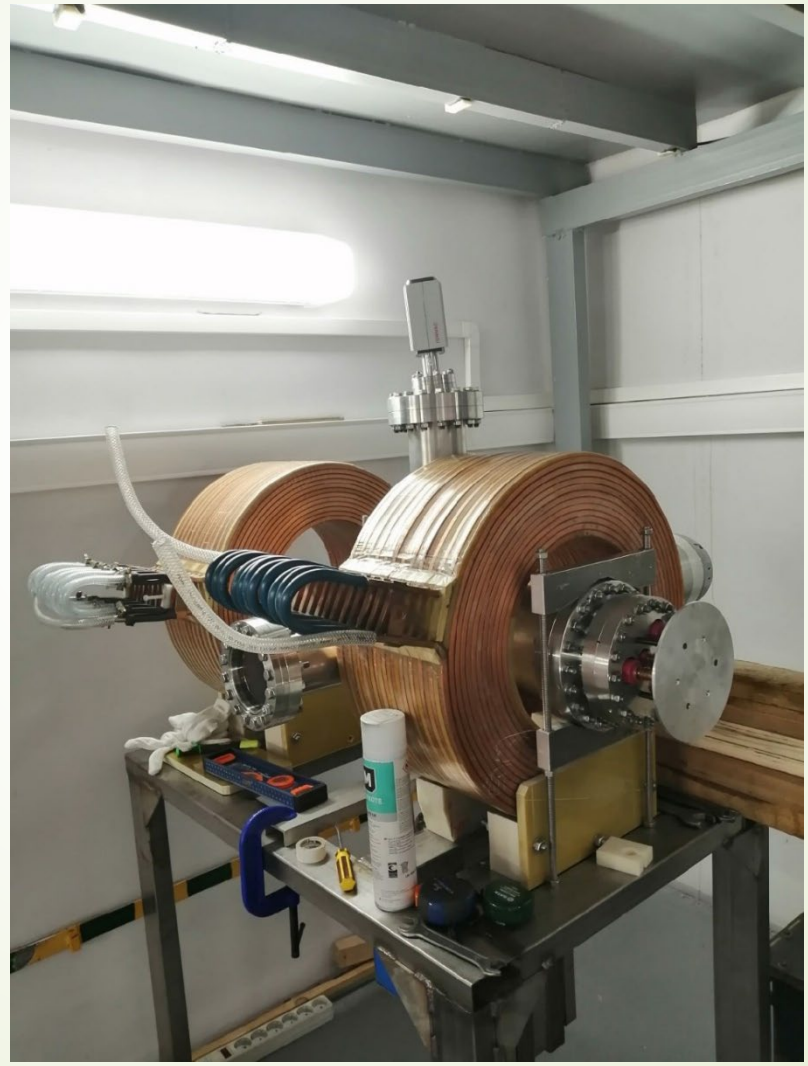
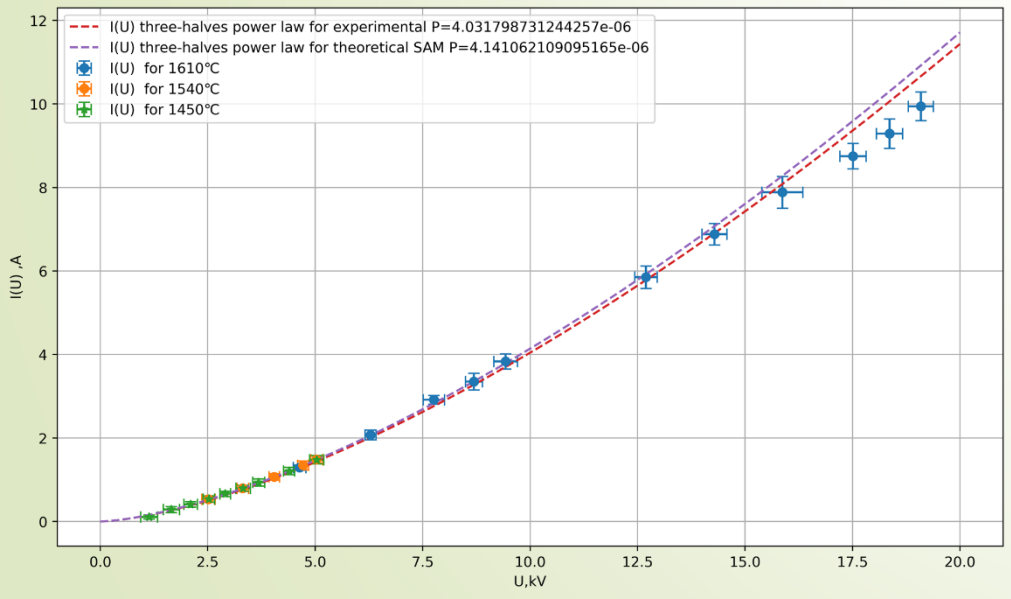
$$\left(\frac{r}{r_c}\right)^2 = \frac{B_c}{B}$$



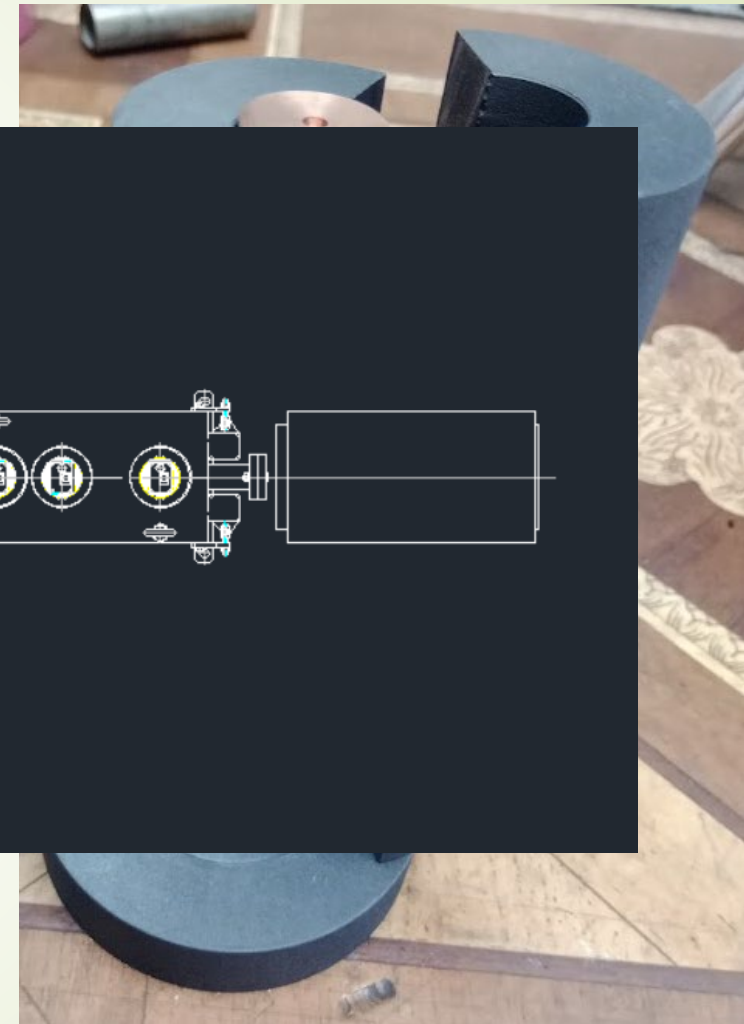
Источники электронов: разработка источника интенсивных электронных пучков кольцевого типа на основе электронной пушки с термокатодом

Было достигнуто:

- Температура накала катода 1210 – 1410 С°
- Ускоряющее напряжение до $U = 17$ кВ
- Ток эмиссии до ~ 2.5 А
- Максимальное значение ведущего магнитного поля $B_{\text{max}}^{\text{ведущее}} \sim 80$ мТл



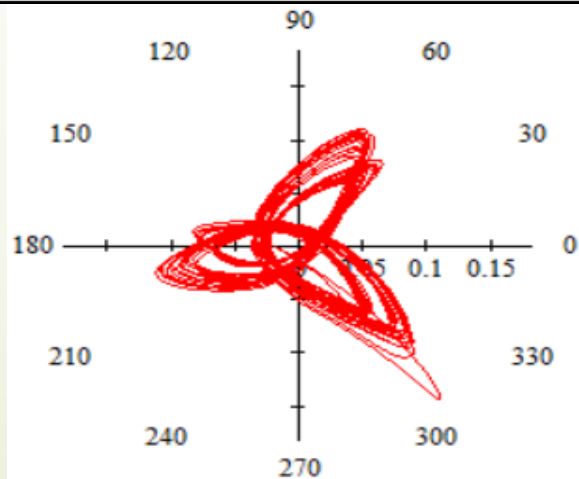
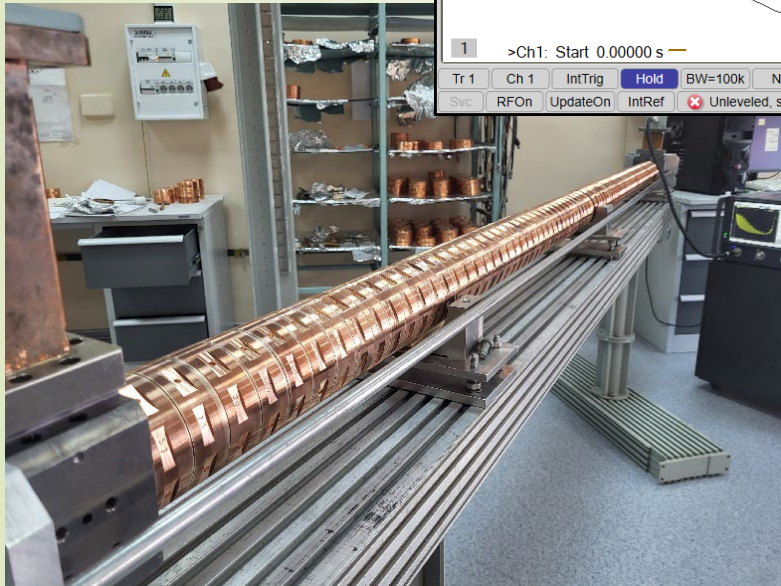
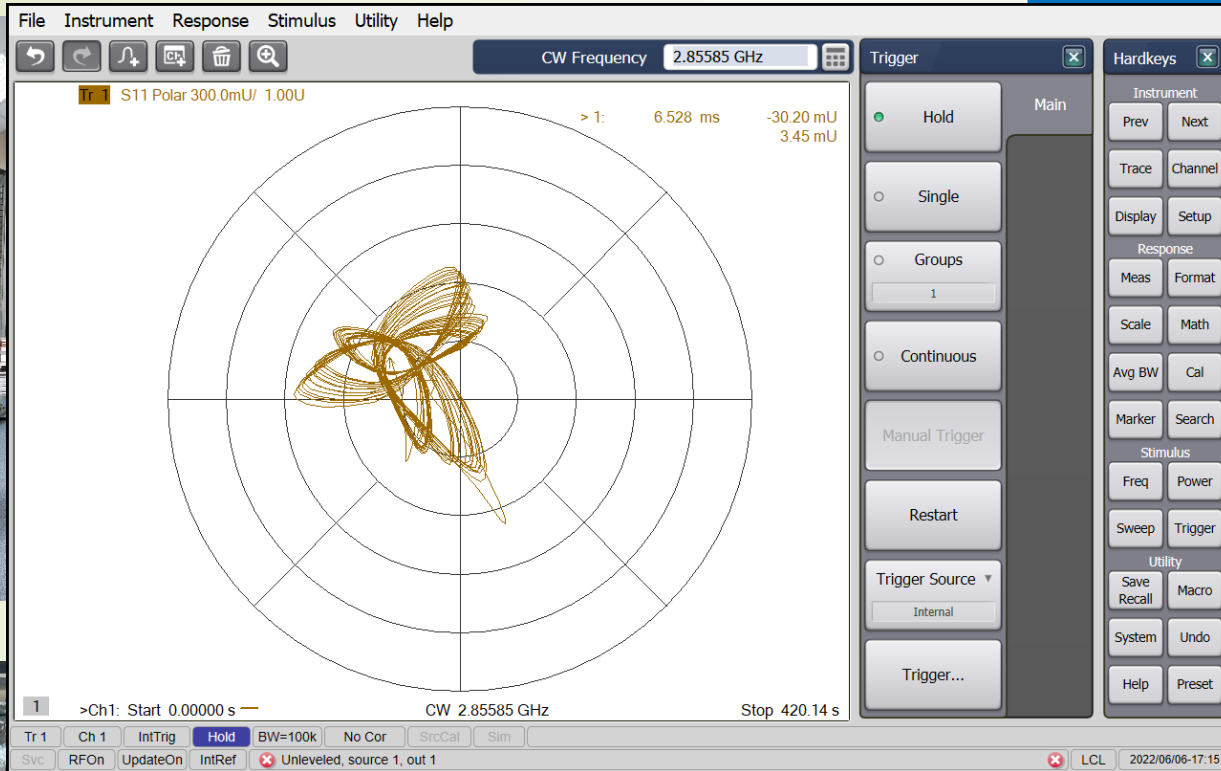
Ускоряющие структуры: миллиметровая ускоряющая структура



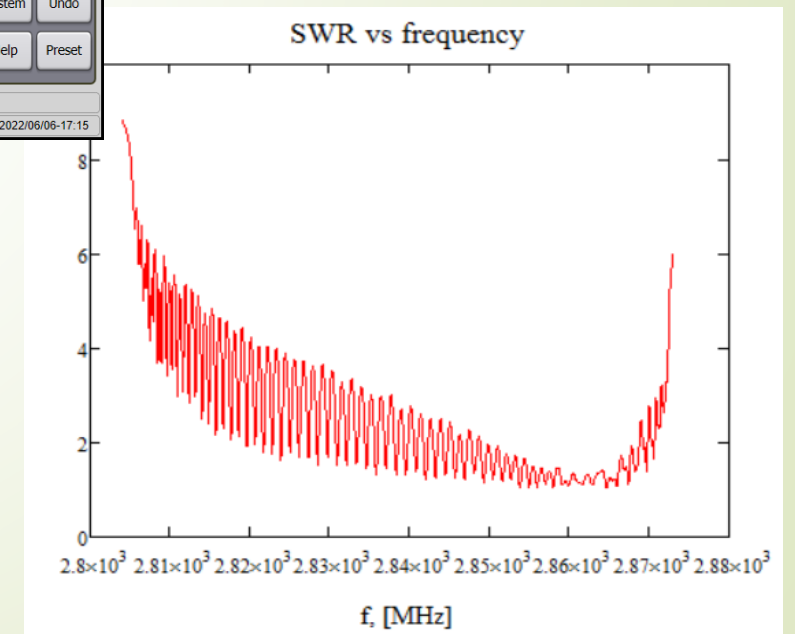
Одна из двух паяных структур и оснастка из нержавеющей стали, в каждой структуре – 44 ячейки

Структура в графитовой оснастке

Ускоряющие структуры: регулярные ускоряющие структуры для инжектора СКИФ



Рабочая частота при вакууме и при T=25 C°	2856.6 МГц
Значение регулярной ускоряющей структуры при T=25 C°	2851.744 МГц (2851.919/2851.600 МГц)
Частота на воздухе при T=25 C°	2855.7 МГц
Количество регулярных ускоряющих ячеек	2 шт
Число колебаний (сдвиг фазы на 2π/3)	83 шт
Погрешность фазы на структуру по фазе	2π/3
Добротность не менее	0.8°
Число колебаний на рабочей частоте	1.35·10 ⁴
	1.4



Клистрон



коллектор

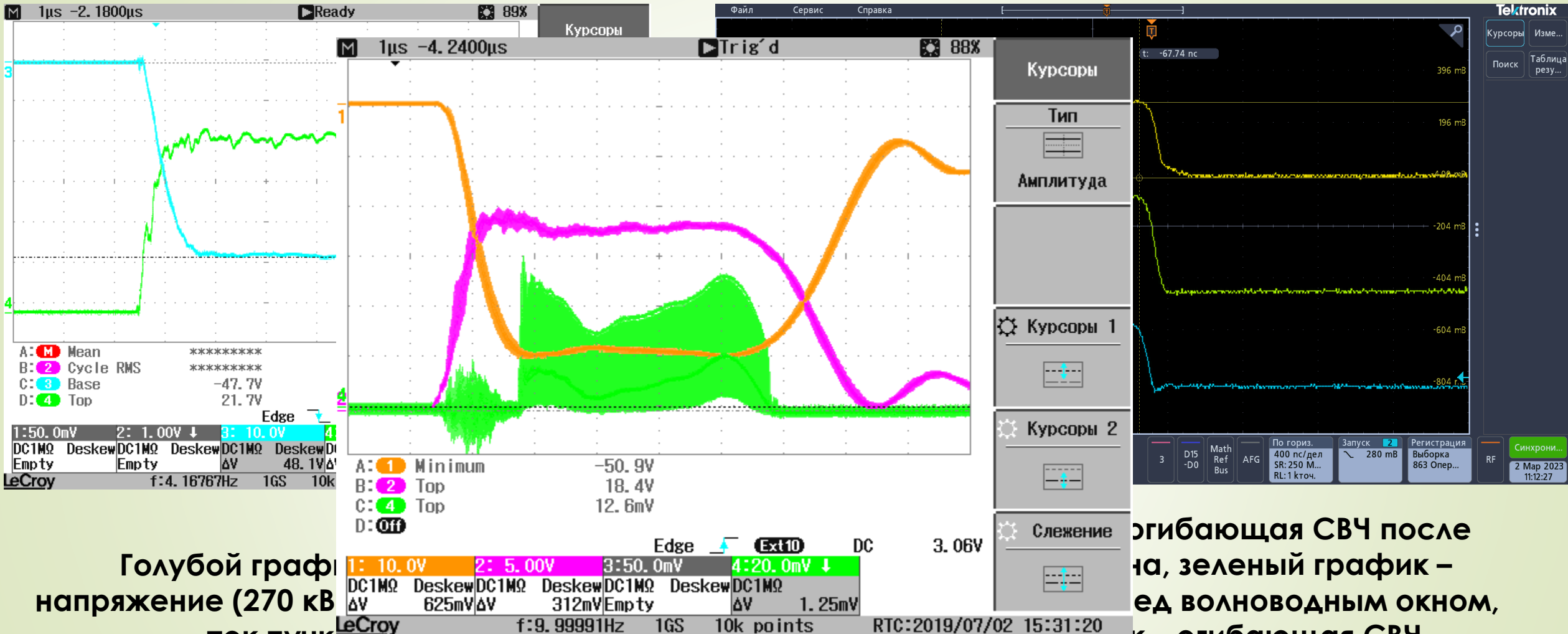
В 2021 году запущен макет клистрона II, который показал мощность 50 МВт на частоте 2888 МГц. Данный клистрон перестал работать из-за быстрой деградации катода вследствие многократных пробоев высоковольтного напряжения из-за нестабильности модулятора. Было решено начать производство нового клистрона.



Клистрон III

Клистрон III не является аналогом Клистрона II. Здесь заложены новые возможности по настройке частот. Учтены ошибки, приводящие к уходом размеров. Кроме этого, здесь выбраны другие частотные характеристики резонаторов, которые были получены в том числе благодаря развитию методов расчета клистрона.

Клистрон: режим тренировки

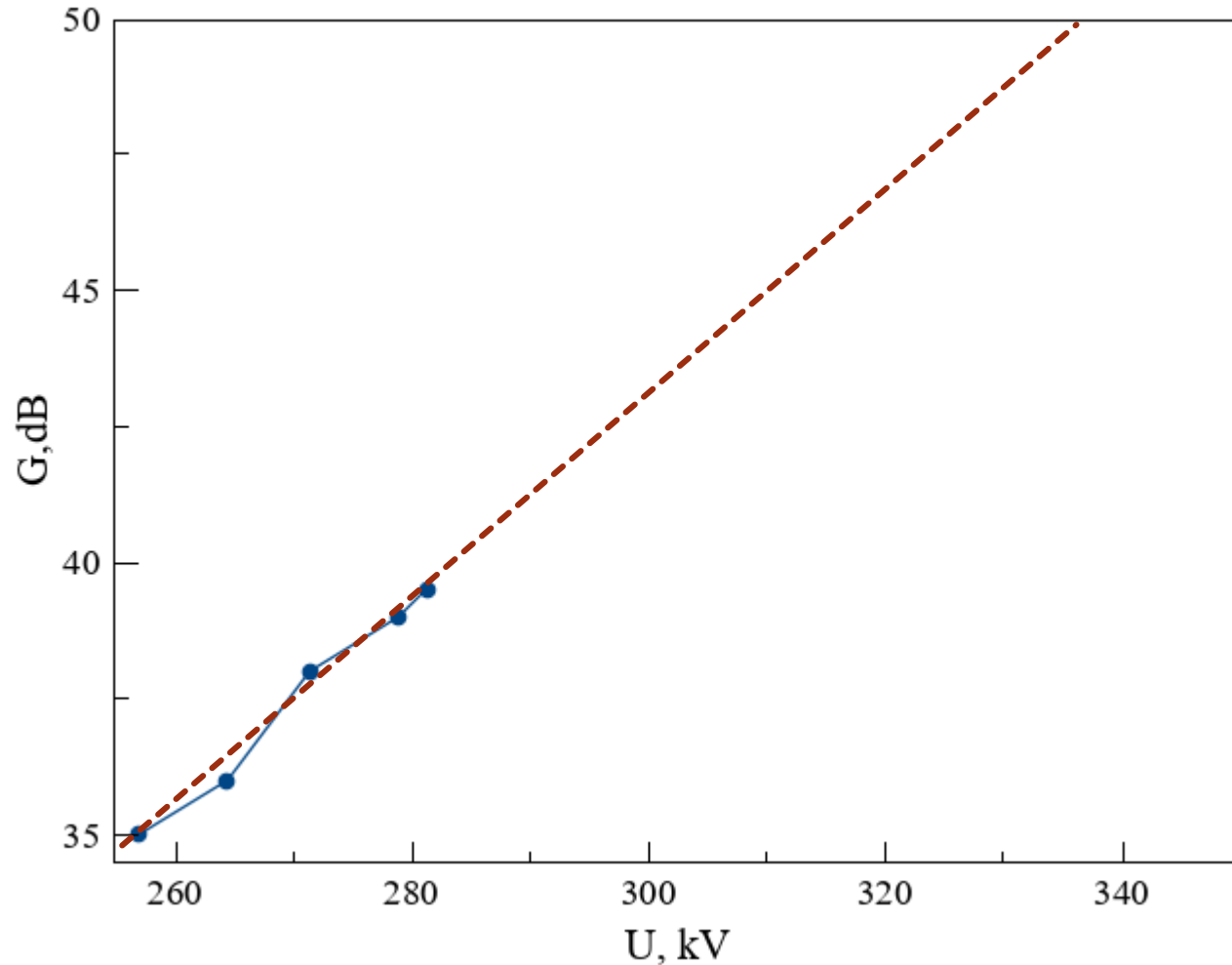


Голубой график – напряжение (270 кВ) – ток пучка (210 А)

оранжевый график – огибающая СВЧ после на, зеленый график – огибающая СВЧ перед волноводным окном, голубой график – огибающая СВЧ предусилителя

Клистрон: попытка предсказания

Пока тренировка клистрона проходит вполне адекватно. Есть осторожная надежда, что мы получим необходимую мощность. Однако, нужно понимать, что процесс только начался.



Что может помешать:

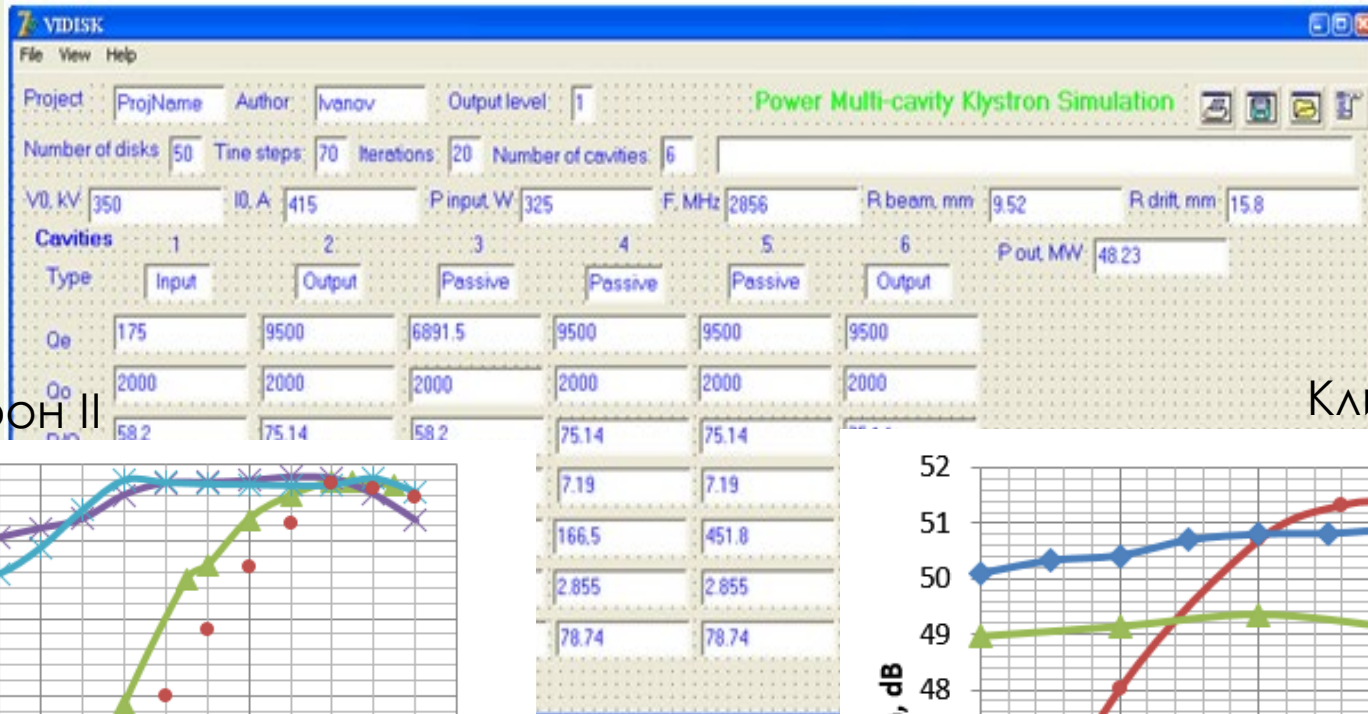
1. Преждевременный выход на насыщение по напряжению
2. Преждевременный выход на насыщение по входной мощности
3. Самовозбуждение пучка
4. То, чего мы еще не понимаем

Что может помочь:

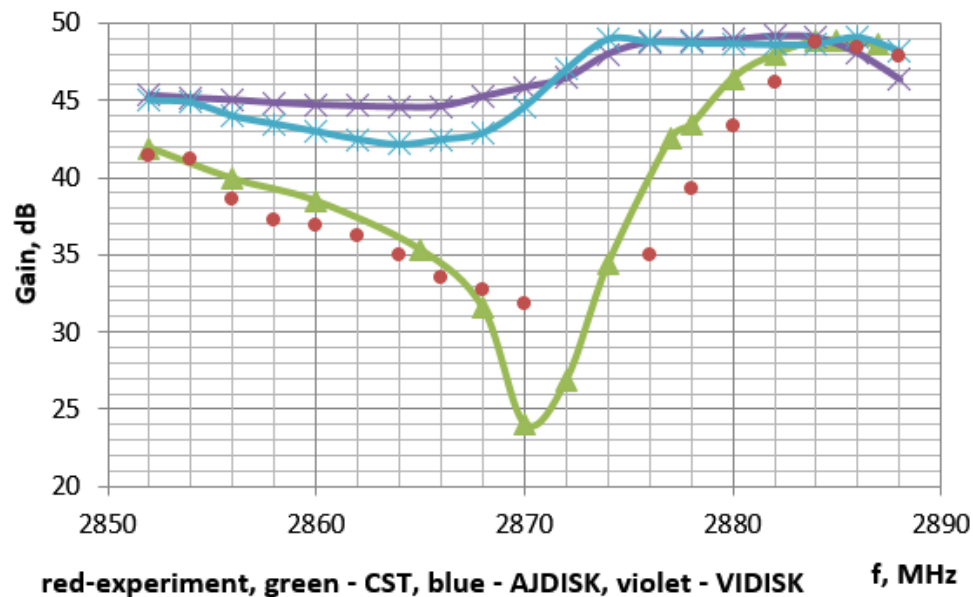
1. Другое согласование со входным резонатором
2. Магнитное поле соленоида (оно сильно влияет на выходную мощность)
3. Попытка увеличения первеанса
4. То, что мы еще не придумали

Клистрон: разработка собственного кода для расчетов клистрона

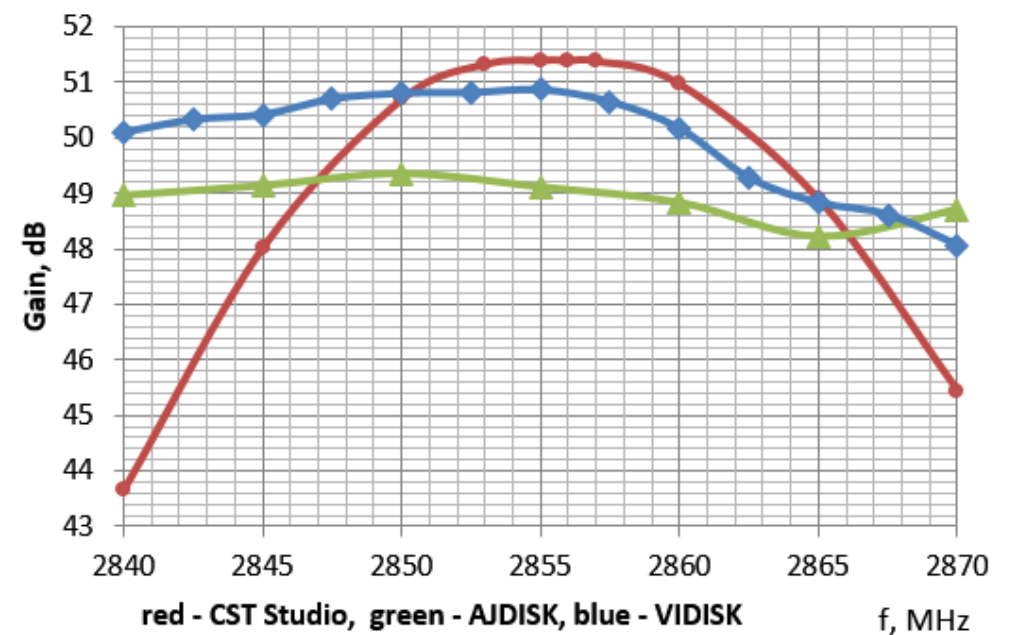
Расчет клистрона производился с помощью CST Studio. Данный код требует больших временных и машинных ресурсов, что сильно ограничивает быструю оптимизацию. Давно стало очевидно, что необходимо иметь собственный код для оптимизации клистрона. В 2022 продолжили создание 1D кода для моделирования клистронов.



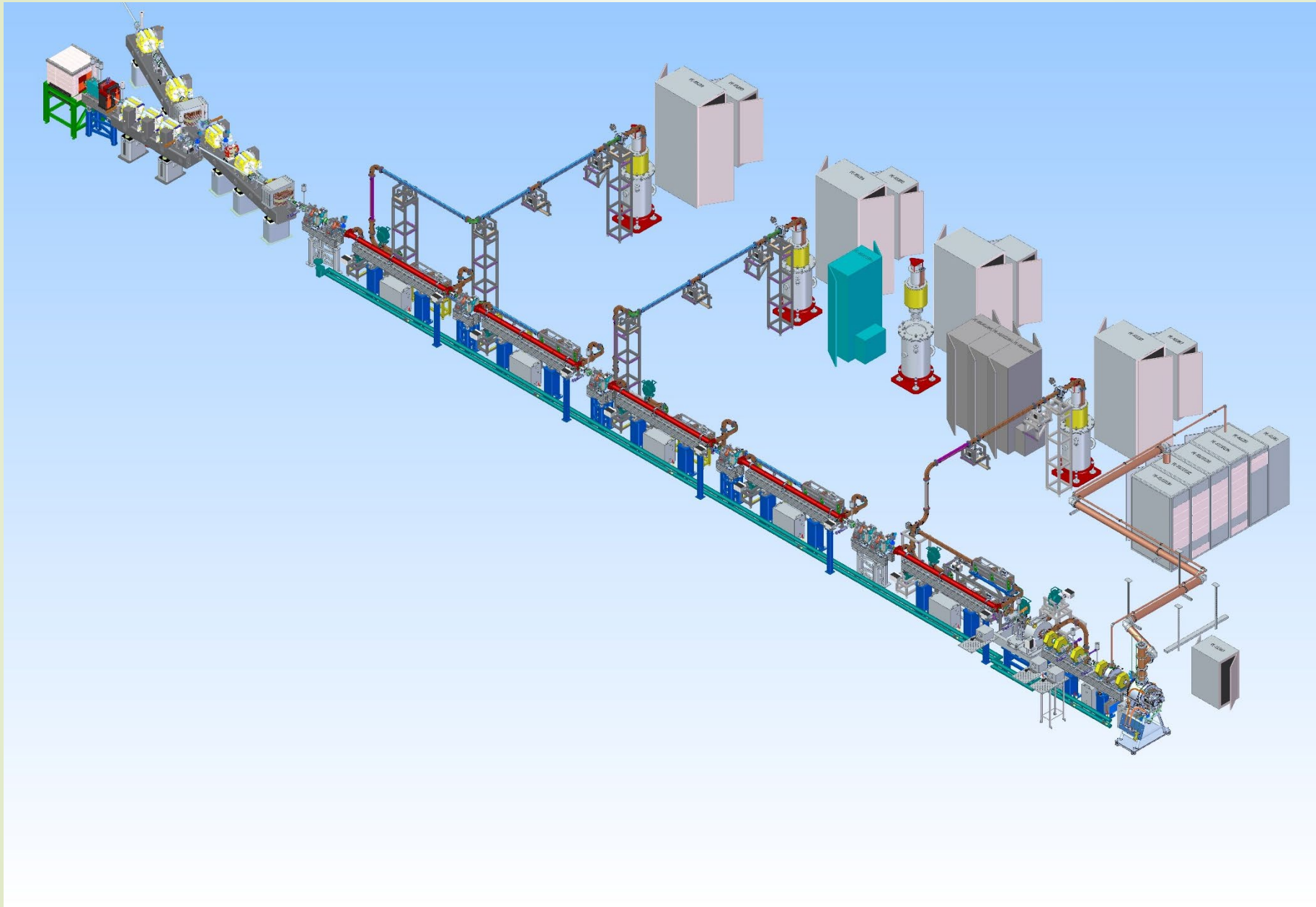
Клистрон II



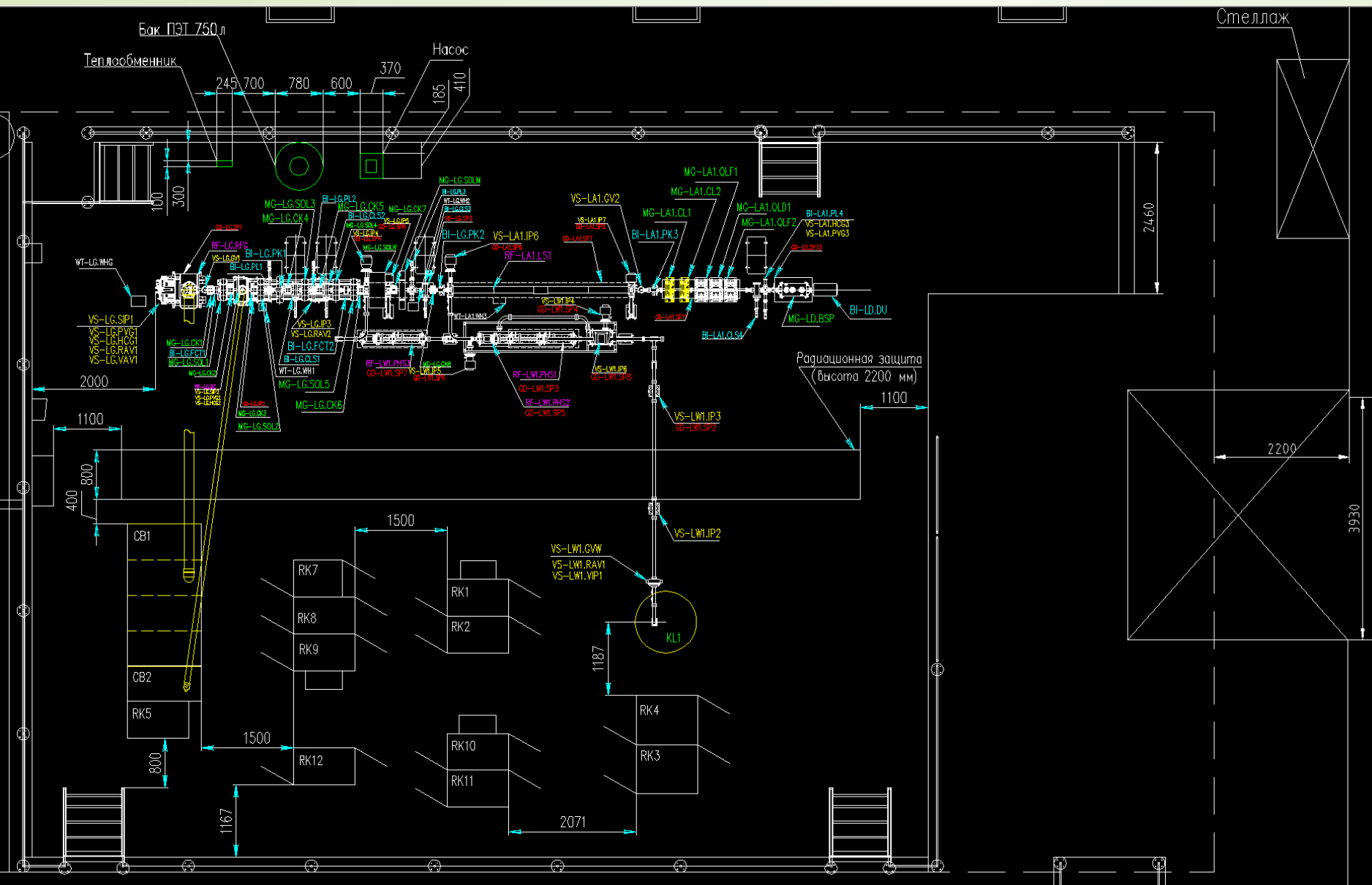
Клистрон III



СКИФ: линейный ускоритель инжектора



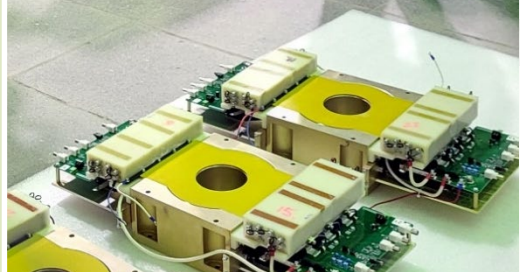
СКИФ: стенд инжектора



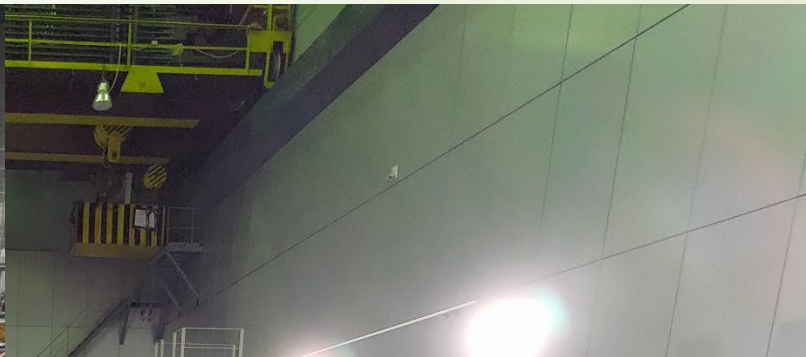
RK1	Libera (синхронизация)
RK2	ПЛК, оптическая диагностика, фазовращатели
RK3	Управление модулятором клистрона
RK4	Модулятор клистрона
RK7	Электромагнитная диагностика
RK8	Система термостабилизации
RK9	Вакуумная система
RK10	Источники питания магнитов
RK11	Источники питания магнитов
RK12	Серверы
CB1	Генератор СВЧ пушки
CB2	Генератор группирующего резонатора

В 2021 году начали готовиться к реальным экспериментам с инжектором СКИФ

СКИФ: стенд инжектора

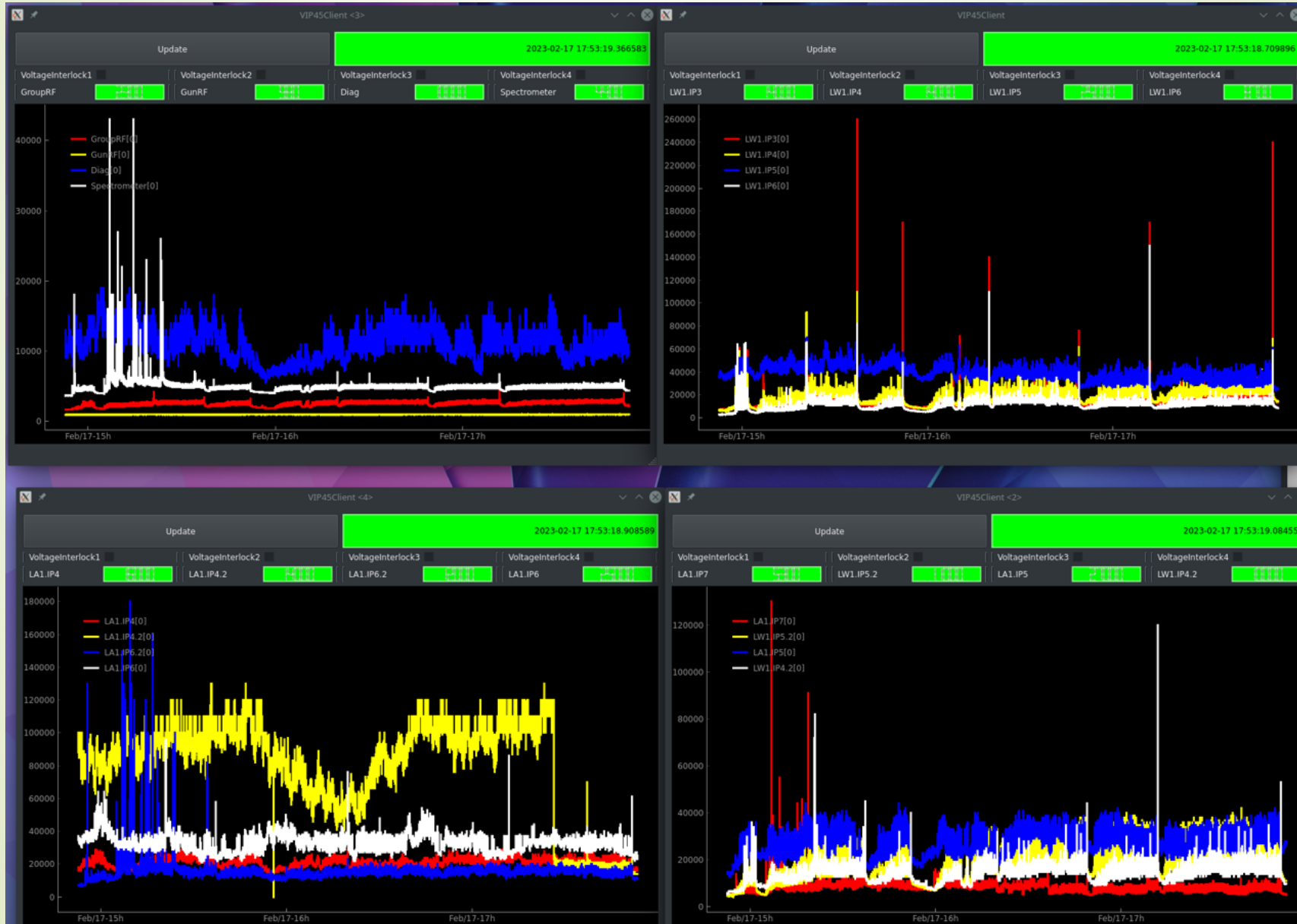


СКИФ: стенд инжектора

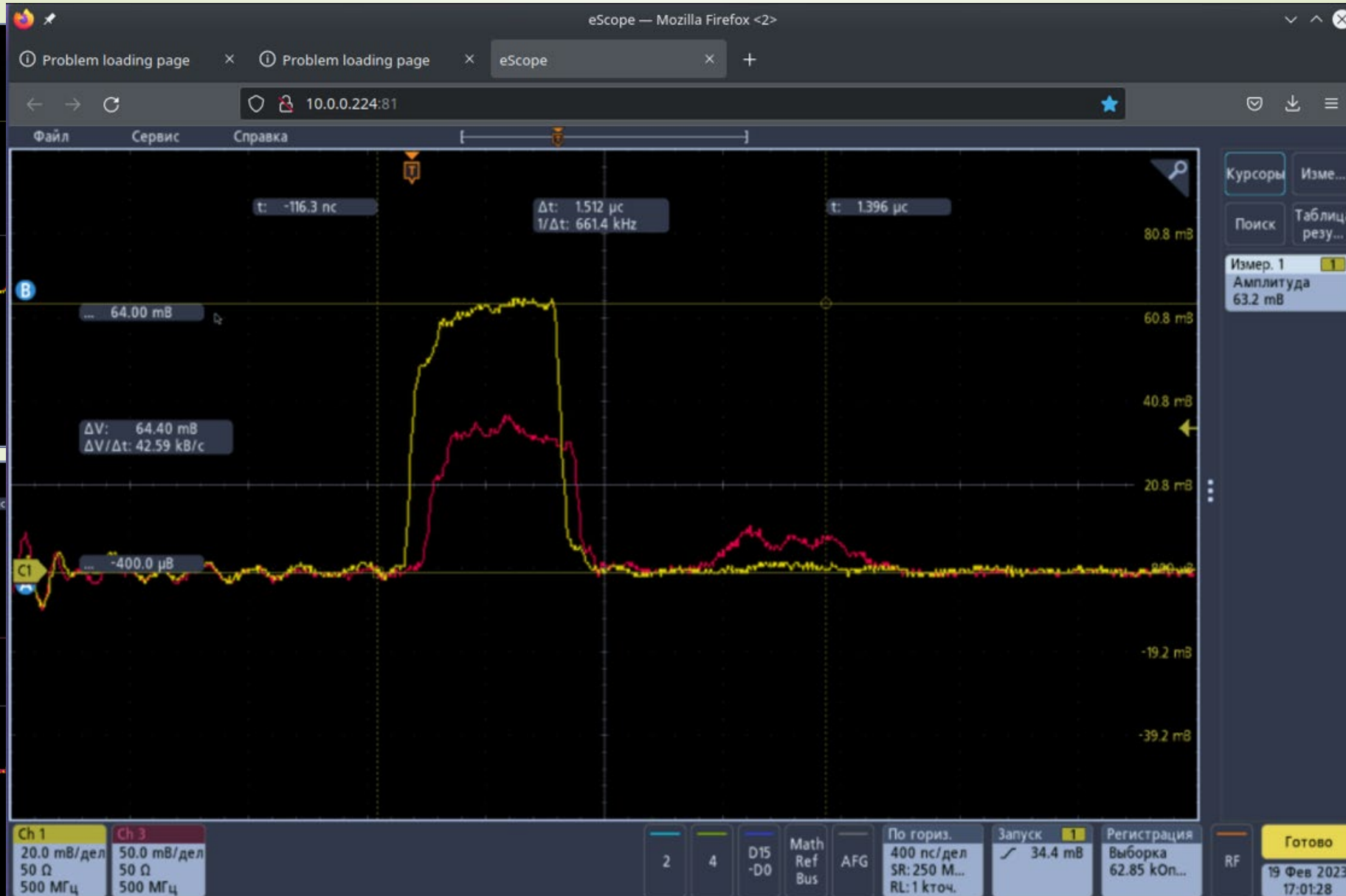


СКИФ: тренировка

Типичная картинка с вакуумом при процессе тренировки



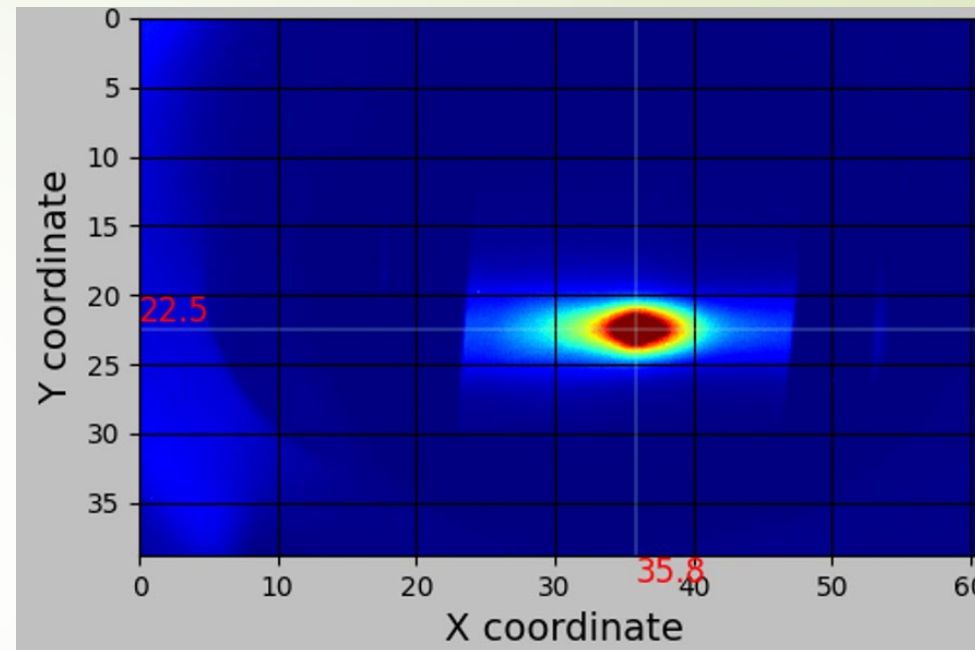
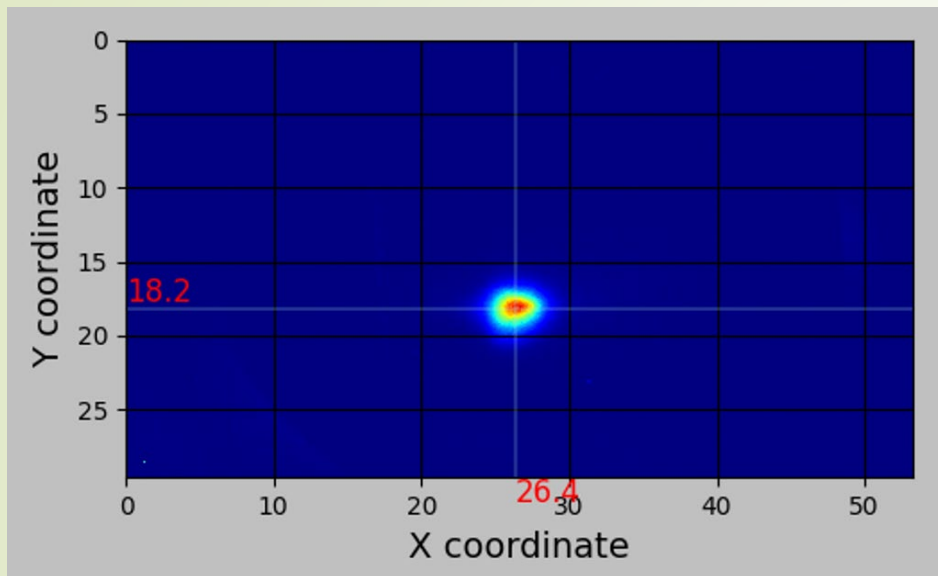
СКИФ: тренировка



СКИФ: достигнутые результаты

Пучок на люминофоре перед спектрометром

W= 30 MeV



Сигналы с датчиков тока FCT Vergoz: желтый – после пушки, голубой – перед ПГ, фиолетовый – после УС. По амплитуде сигналов до УС долетает 100% пучка, до конца УС – 70%

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ