

# Линейные ускорители в ИЯФ СО РАН

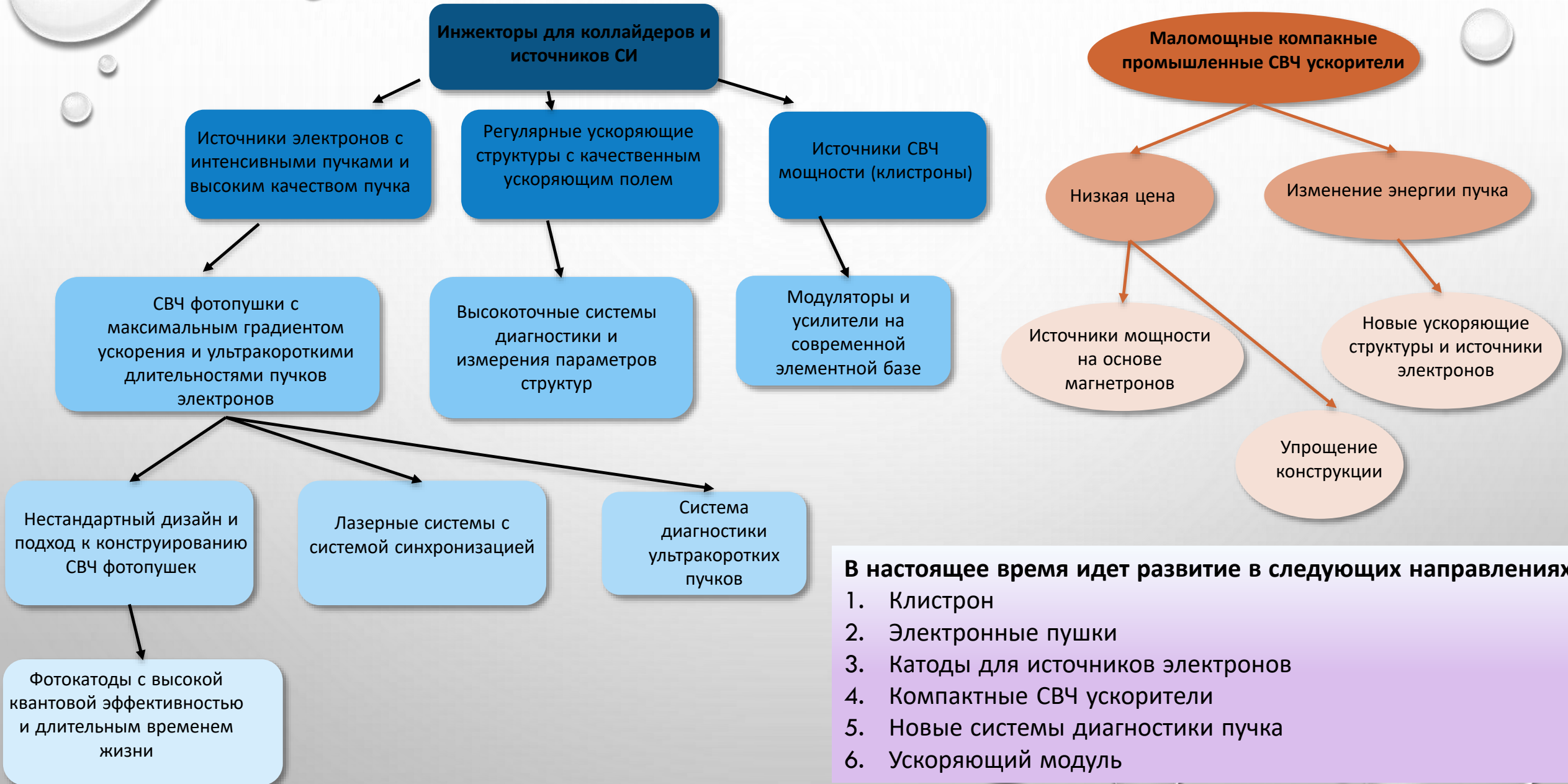
Научная сессия ИЯФ

А.Е. Левичев

[A.E.Levichev@inp.nsk.su](mailto:A.E.Levichev@inp.nsk.su)

16.03.2018

# Введение



**В настоящее время идет развитие в следующих направлениях:**

1. Клистрон
2. Электронные пушки
3. Катоды для источников электронов
4. Компактные СВЧ ускорители
5. Новые системы диагностики пучка
6. Ускоряющий модуль

# Разработка клистрона: 50 МВт, 2856 МГц, 3.5 мкс



## Изготовлены и собраны:

- коллектор пучка,
- катодный узел
- пролетная часть.

Все элементы собраны, проверены на вакуум с прогревом до  $150^{\circ}\text{C}$ .



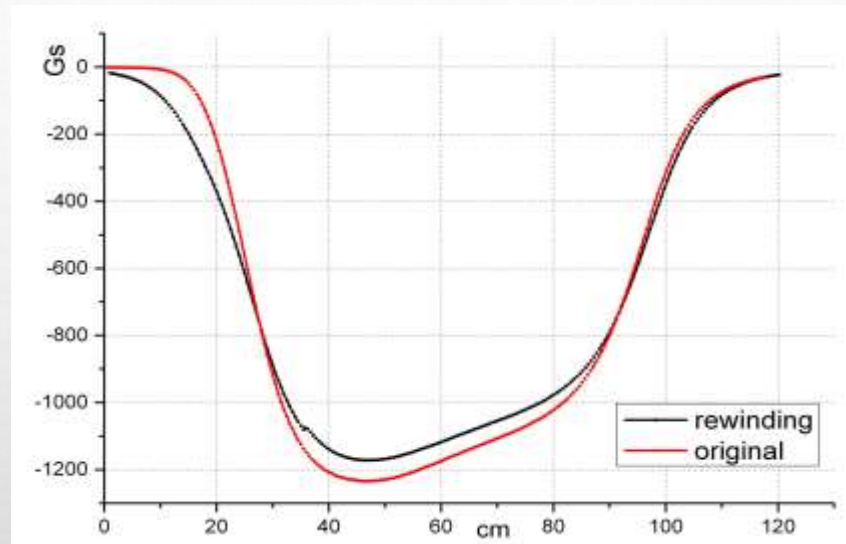
## Основные проблемы:

- Изготовление керамических соединений
- Точности изготовления
- Технологические процессы ИЯФ, которые часто приводят к существенному изменению конструкции



# Разработка клистрона: фокусирующая система

Разработано и изготовлено два  
соленоида



# Разработка клистрона: выходной волноводный тракт

## Разработаны:

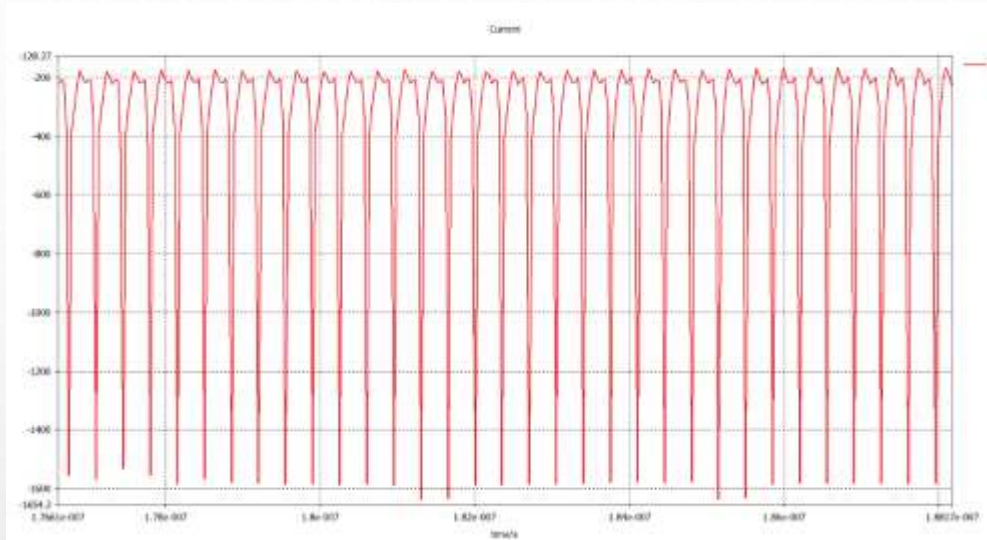
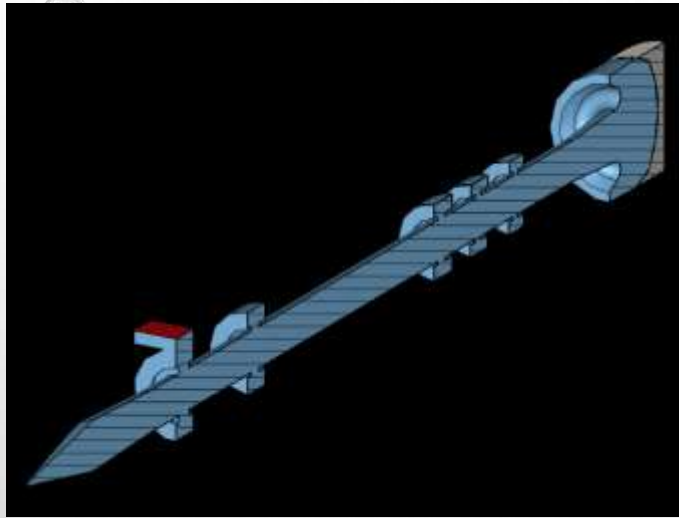
- волноводный делитель-сумматор с двумя вакуумными волноводными окнами баночного типа (разработка ИЯФ)
- волноводное окно на бегущей волне

## Основные проблемы:

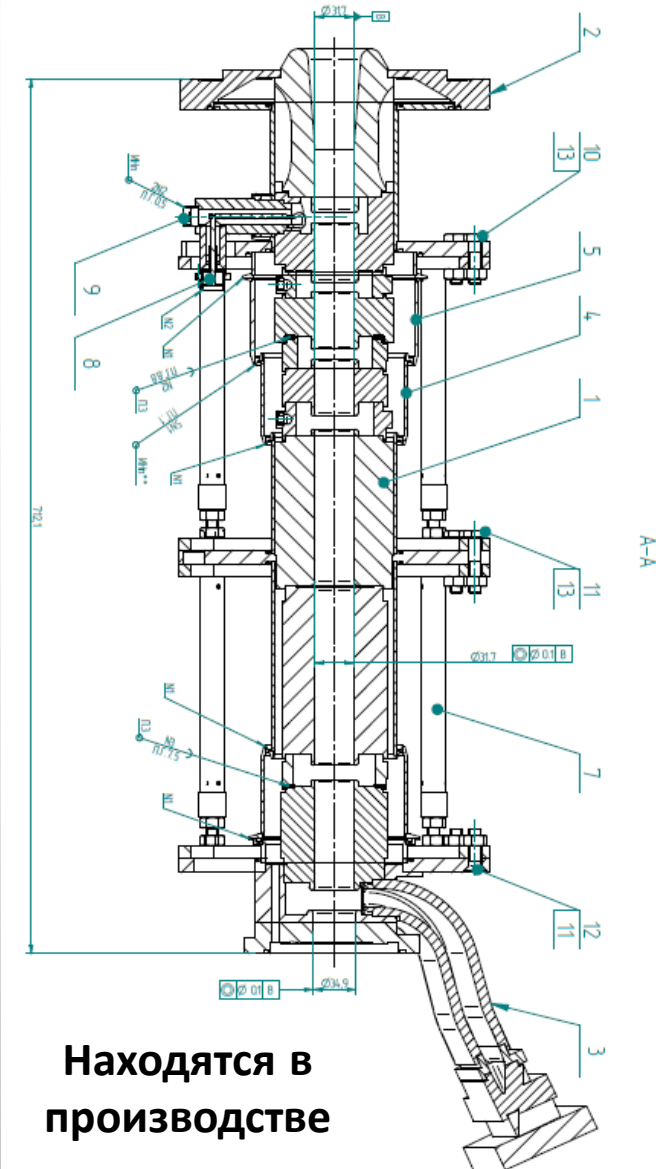
- Качество «нашей» керамики не всегда стабильно
- Качество пайки керамических элементов



# Разработка клистрона: группирующие резонаторы

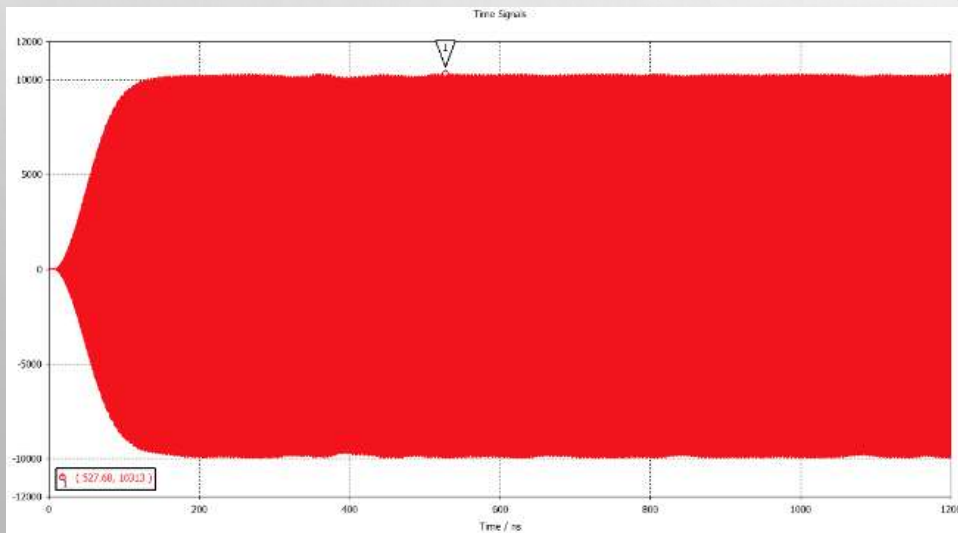


Ток сгустков пучка в выходном резонаторе



Находятся в  
производстве

Проведено численное моделирование клистрона. В ходе моделирования пришлось научиться избавляться от численных неустойчивостей пучка, возникающих в процессе расчета. Выходная мощность моделируемого клистрона 50 МВт.



Амплитуда выходного сигнала, соответствующая мощности 50 МВт

# Разработка клистрона: модулятор



Высоковольтная часть модулятора



Бак импульсного трансформатора



Импульсный трансформатор

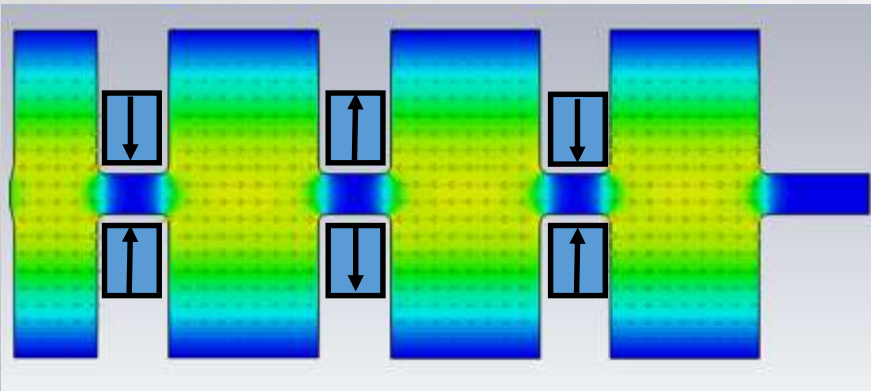
# СВЧ фотопушка



Макет «классической» полторорячечной СВЧ пушки



Будущий СВЧ стенд для тренировки элементов СВЧ ускорителей



Макет СВЧ фотопушки на основе 1.5 ускоряющей ячейки изготовлен, настроен, откачен и готов к тестирования при высоком уровне СВЧ мощности. Для этого создается СВЧ стенд с локальной радиационной защитой от темновых токов.

Заряд пучка	1.5 нКл
RMS длина пучка	1 мм
Нормализованный эмиттанс	3 мм мрад
Энергия	6.5 МэВ

Предложена новая СВЧ фотопушка на основе СПС, которая получила высокую оценку на семинарах в КЕК и ЦЕРН



# Фотокатоды для СВЧ пушки



Изготовлено 5 катодов на основе сплава  $\text{Ir5Ce}$  для тестирования в режиме фотоэмиссии и термоэмиссии



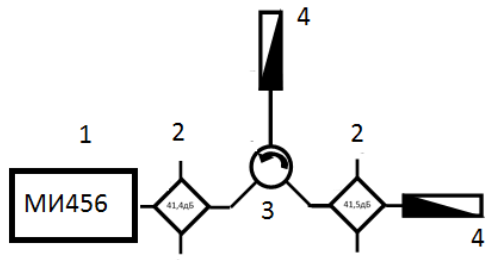
Подготовка стенда для тестирования катодов в режиме термоэмиссии для возможного использования, как источника интенсивных электронных пучков



Вакуумная камера для стенда тестирования катодов в режиме фотоэмиссии. Стенд будет создан совместно с Институтом лазерной физики СО РАН.

# Компактный ускоритель для промышленного применения

Испытательный стенд



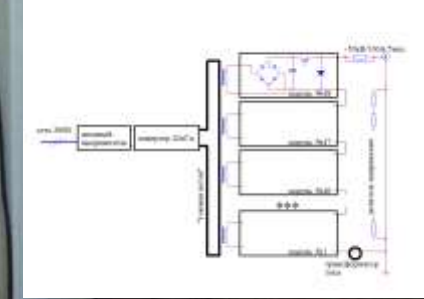
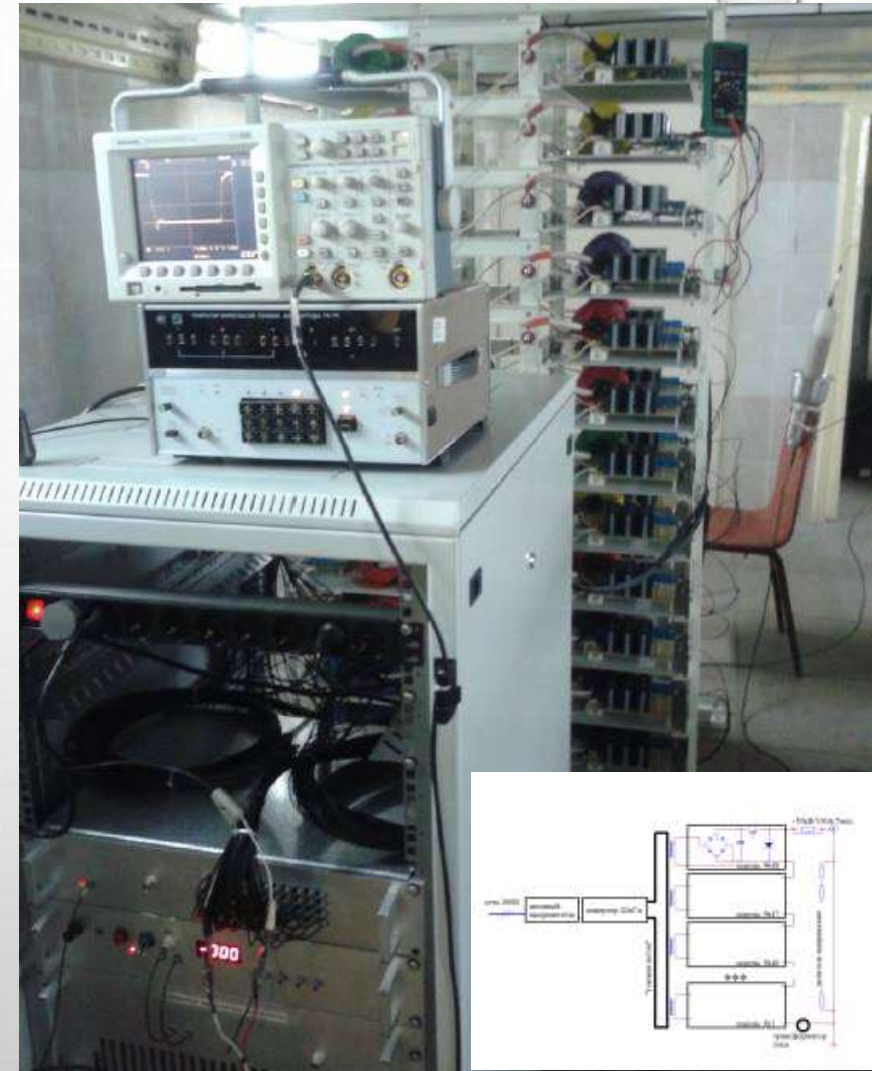
1– магнетрон, 2- ответвитель,  
3- циркулятор, 4- нагрузка

Параметры магнетрона МИ-456

Параметр, измерения	единицы	Значение
Частота, МГц		2851
Мощность выходная, МВт	импульсная	3.5
Напряжения анода, кВ		55
Ток анода импульсный, А		100
Длительность импульса, мкс		6
КСВ		1.25
Скважность не менее		550

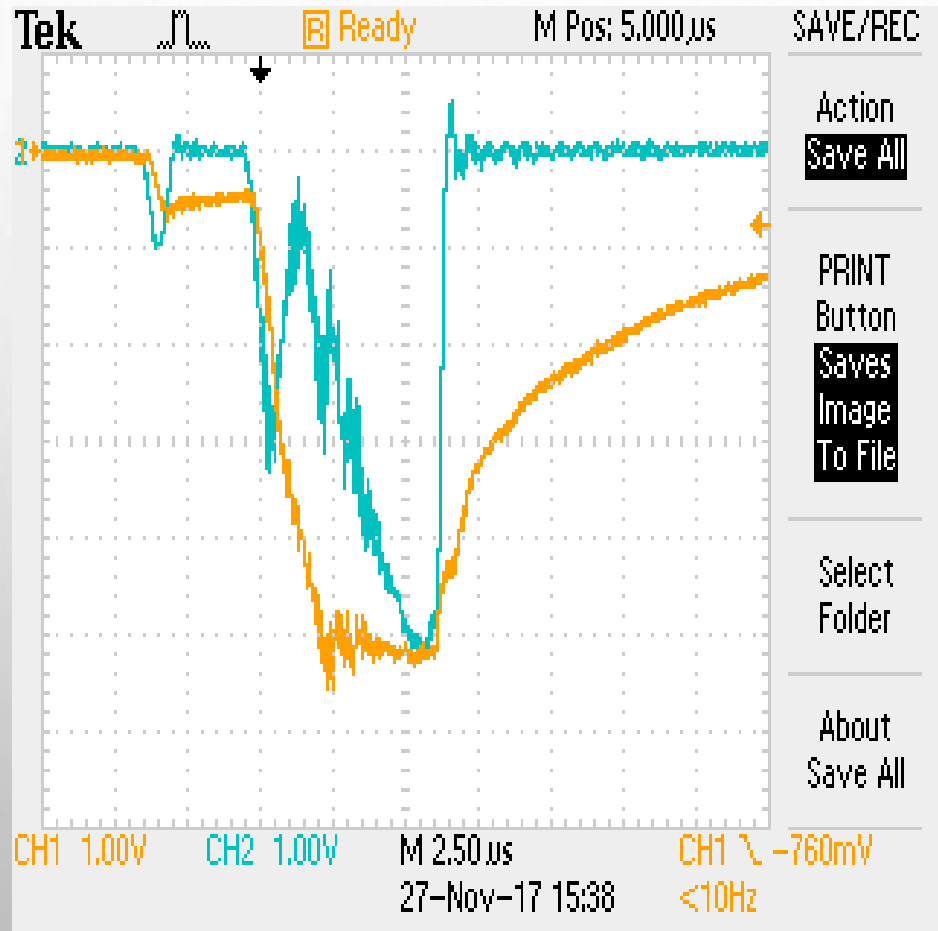
Параметры модулятора

Параметр, измерения	единицы	Значение
Частота повторения	Гц	1..200
Мощность выходная, МВт	импульсная	2.2-24
Напряжения выхода, кВ		45-60
Выходной ток импульсный, А		50-400
Длительность импульса, мкс		3-8
Фронт импульса не менее, нс		200

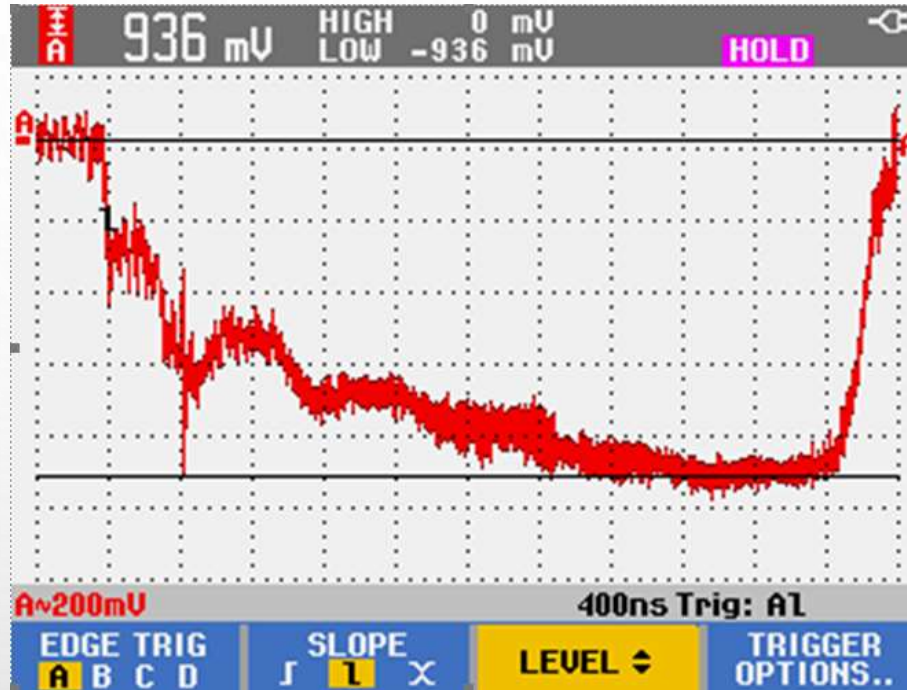


Модулятор

# Компактный ускоритель для промышленного применения



**CH1 – высокое напряжение модулятора,  
CH2 – ток модулятора**

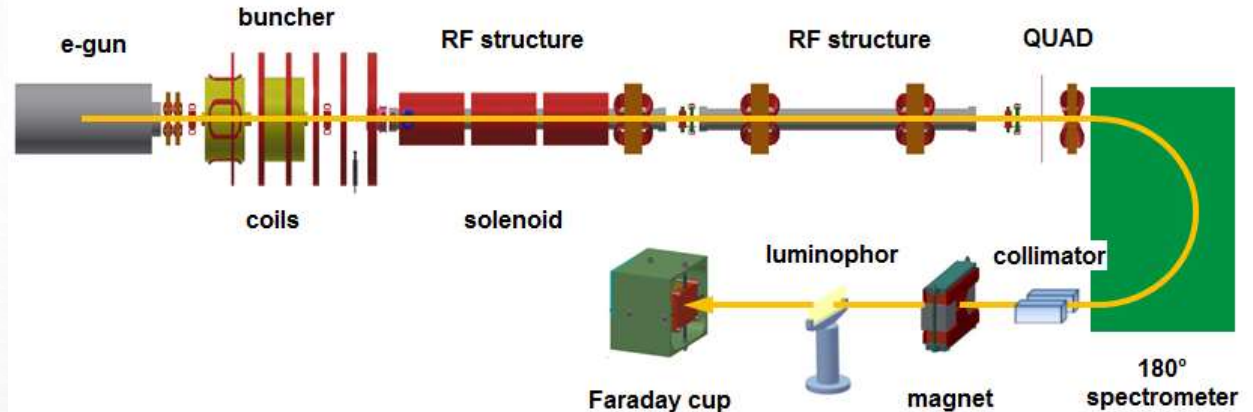


## Огибающая СВЧ сигнала магнетрона

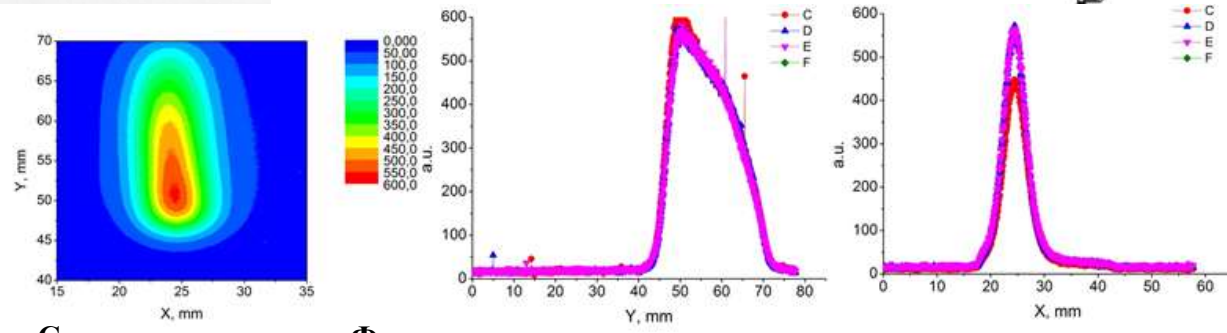
СВЧ стенд был собран для получения генерации СВЧ мощности магнетрона. В результате получена мощность в волноводном тракте в районе 1.5 МВт. В 2018 году планируется работа с ускоряющей структурой и ускоренными электронами.



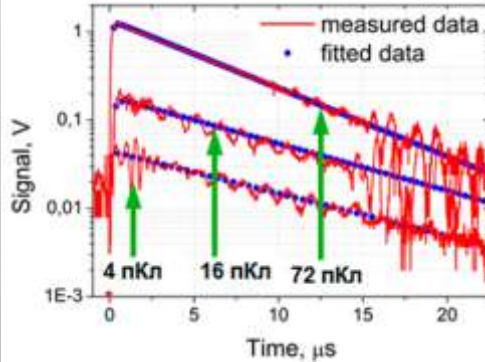
# Лазерно-кильватерное ускорения (совместный проект ИЯФ и ЛФ)



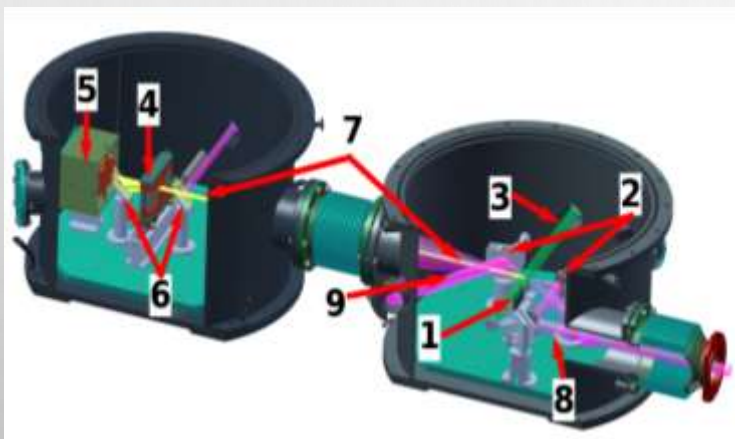
Распределения яркости сигнала от электронного сгустка, снятые ПЗС-камерой



Сигналы с цилиндра Фарадея



Для стенда в ЛФ изготовлены цилиндр Фарадея и спектрометр на основе постоянных магнитов с полем до 1 Т. Данный изделия протестированы на инжекционном комплексе ВЭПП-5.



1 – supersonic gas jet, 2 – focusing mirrors, 3 – laser beam for diagnosing the jet density, 4 – electron spectrometer magnet, 5 – Faraday cup, 6 – phosphor screens, 7 – electron beam, 8 – driving laser beam, 9 – scattered laser beam.

# Работа над ускоряющим модулем 200 МэВ



**В ускоряющий модуль входят:**

4 ускоряющих секций

2 системы умножения мощности типа SLED

4 фазовращателя

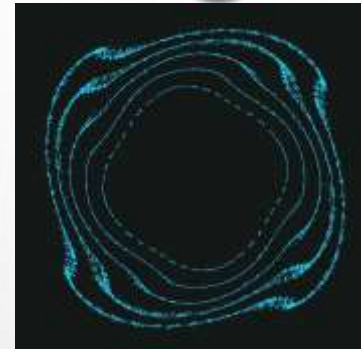
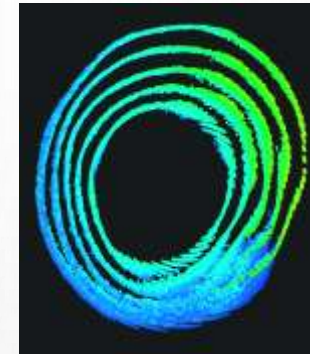
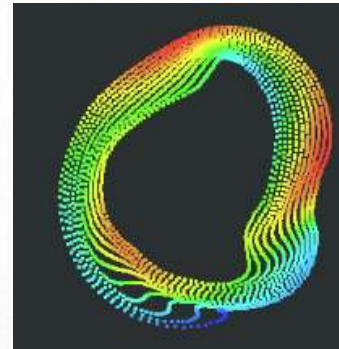
6 СВЧ нагрузки

В настоящее время подготавливаются конструкторские чертежи для изготовления элементов ускоряющего модуля.

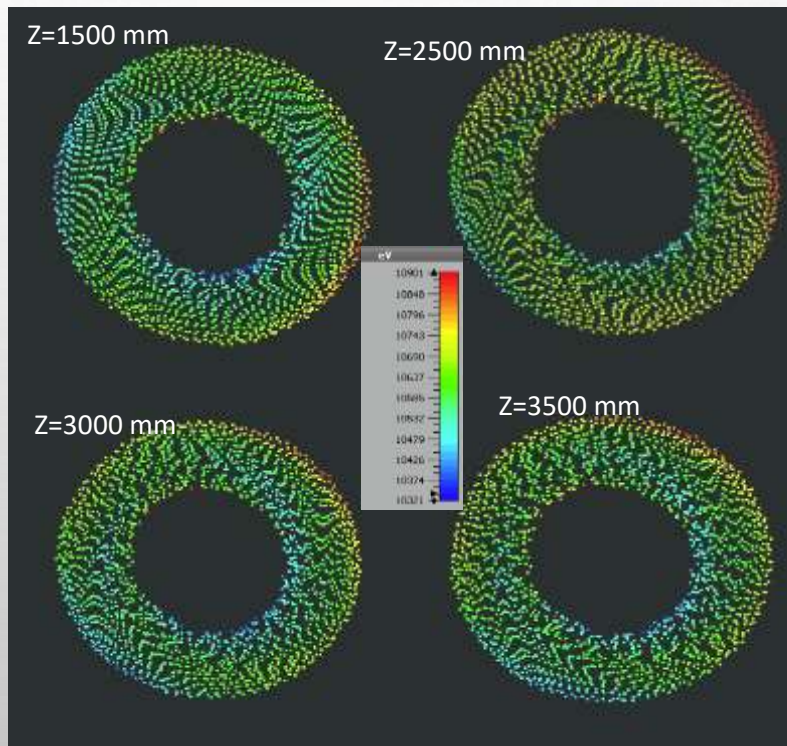
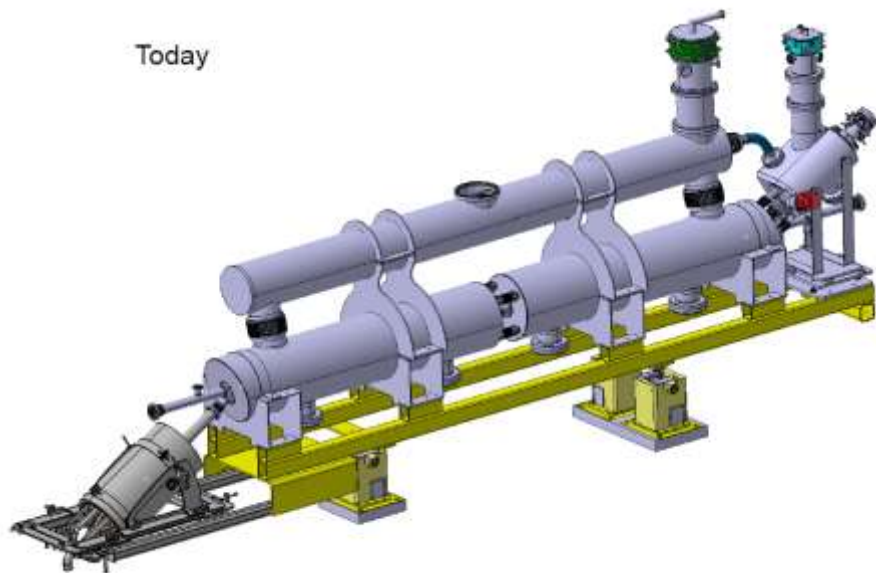
Кроме самих элементов, разрабатывается измерительный стенд для тестирования ускоряющих секций.

# Международное сотрудничество: ЦЕРН, электронная линза для HiLumi

Nominal magnetic field of the main solenoid	5 T
Nominal magnetic field in the e-gun cathode	0.2 T – 4 T
Inner radius of the hollow electron beam @ nominal fields	0.9 mm ( $3\sigma$ )
Outer radius of the hollow electron beam @ nominal fields	1.8 mm ( $6\sigma$ )
Inner diameter of the cathode	8.05 mm
Outer diameter of the cathode	16.10 mm
Inner radius of the hollow electron beam @ 5 T with 2.5 T @ cathode	5.67 mm
Outer radius of the hollow electron beam @ 5 T with 2.5 T @ cathode	11.34 mm
Nominal current at the cathode	Up to 5 A



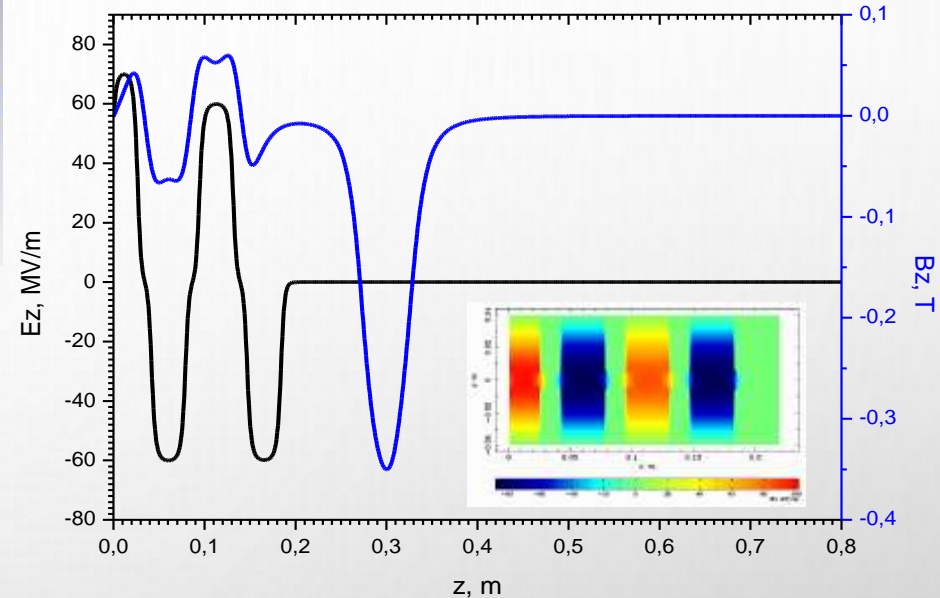
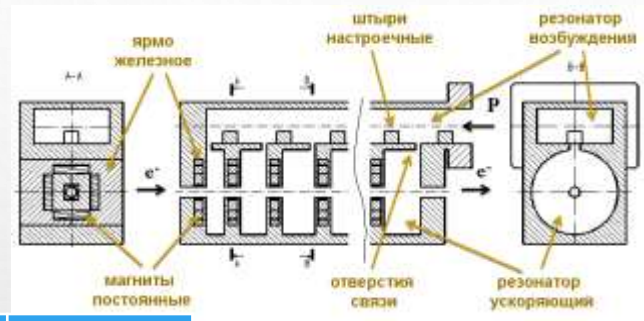
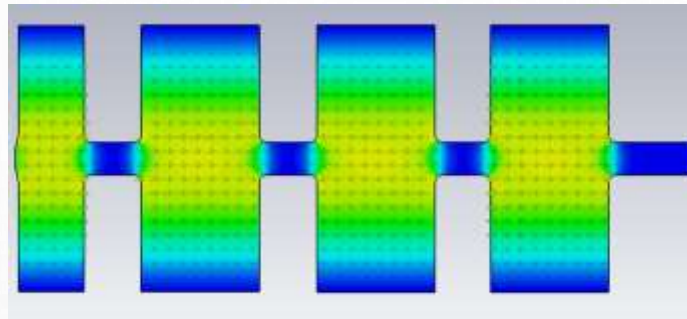
Today



Сотрудничество в рамках HEI позволило изучить и побороть численную неустойчивость и рассчитать клистрон.

# Международное сотрудничество: ЦЕРН, источник электронов для FCC

Simulated parameters for FCC	Value
Beam length (sigma, mm)	1.5
Beam charge (nC)	6
Norm tr. Emittance (mm mrad)	3
Energy (MeV)	9.8
Energy spread (%)	0.7%
Injection phase (deg)	293



Simulated parameters for C-Tau Factory	Value
Beam length (sigma, mm)	1.5
Beam charge (nC)	2
Norm tr. Emittance (mm mrad)	2.3
Energy (MeV)	6.5
Energy spread (%)	~1%
Injection phase (deg)	200

## Сотрудничество в рамках FCC позволило:

- 1) разработать новый дизайн СВЧ фотопушки с интенсивным пучком и низким эмиттансом для с-τ фабрики
- 2) Использовать катод на основе Ir5Ce в качестве фотокатода

# Российское сотрудничество: ОИЯИ, установка ИРЭН



Параметры	Проект	Текущий режим
Частота	2856 МГц	2856 МГц
Длительность	250 нс	~ 100 нс
Энергия	100 МэВ	~50 МэВ
Ток пушки	2 А	до 2 А
Ток ускоренный	2 А	~ 1 А

Сотрудничество в рамках ИРЭН позволит разработать адиабатический группирователь-предускоритель, который необходим для проектов с-т фабрики и источника СИ



## Планы на 2018 год

1. Запустить клистрон в диодном и в СВЧ режимах
2. Протестировать макет СВЧ фотопушки и измерить энергию темновых токов
3. Протестировать Ir5Ce катоды на плотность тока при термоэмиссии, квантовую эффективность, деградацию при использовании мощного лазера
4. Запустить в производство рабочий вариант новой СВЧ фотопушки для пучка с низким эмиттансом
5. Начать работать с электронным пучком на ускорителе с магнетронным СВЧ генератором
6. Разработать элементы измерения параметров ультракоротких пучков
7. Довести стенд измерения ускоряющих структур до «рутинного» использования
8. Начать изготовление элементов 200 МэВ-ого модуля
9. Приобрести лазер

The image features a light gray background with a subtle radial gradient. In the corners, there are several realistic water droplets of various sizes, some overlapping, creating a clean and fresh aesthetic. The text is centered in a bold, black, sans-serif font.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**