

XVII Международная конференция «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»
ЗНЧ-2025

**КОРПУСКУЛЯРНАЯ ДИАГНОСТИКА СИЛЬНОТОЧНОГО
НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА ТИПА НИЗКОИНДУКТИВНАЯ
ВАКУУМНАЯ ИСКРА С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ**

*Е.Д. Вовченко, К.И. Козловский, А.Е. Шиканов, А.П. Мелехов,
Е.А. Морозова, Н.И. Карпов, А.М. Алехин*

**CORPUSCULAR DIAGNOSTICS OF HIGH-CURRENT NANOSECOND
DISCHARGE OF THE LOW-INDUCTANCE VACUUM SPARK TYPE
WITH LASER INITIATION**

*E.D. Vovchenko, K.I. Kozlovskij, A.E. Shikanov, A.P. Melekhov,
E.A. Morozova, N.I. Karpov, A.M. Alyokhin*

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

Низкоиндуктивная вакуумная искра (НВИ) – источник плотной горячей плазмы, образующейся из материала электродов



Роберт Эндрюс Милликен
(Нобелевская премия по
физике 1923 год)

ИСТОРИЯ

1905–1924, Милликен – высоковольтный разряд в вакууме можно использовать в качестве источника коротковолнового ВУФ излучения.

1918, Millican R.A. and Sawyer R. A. *Extreme Ultra-Violet Spectra of Hot Sparks in High Vacua / Physical Review vol. 12, Issue 2, pp. 167-170.*

1924, Millican R.A. and Bowen I.S. *Extreme Ultra-Violet Spectra / Physical Review vol. 23, Issue 1, pp. 1-34.*

First Series

January, 1924

Vol. 23, No. 1

THE

PHYSICAL REVIEW

EXTREME ULTRA-VIOLET SPECTRA

BY R. A. MILLIKAN AND I. S. BOWEN

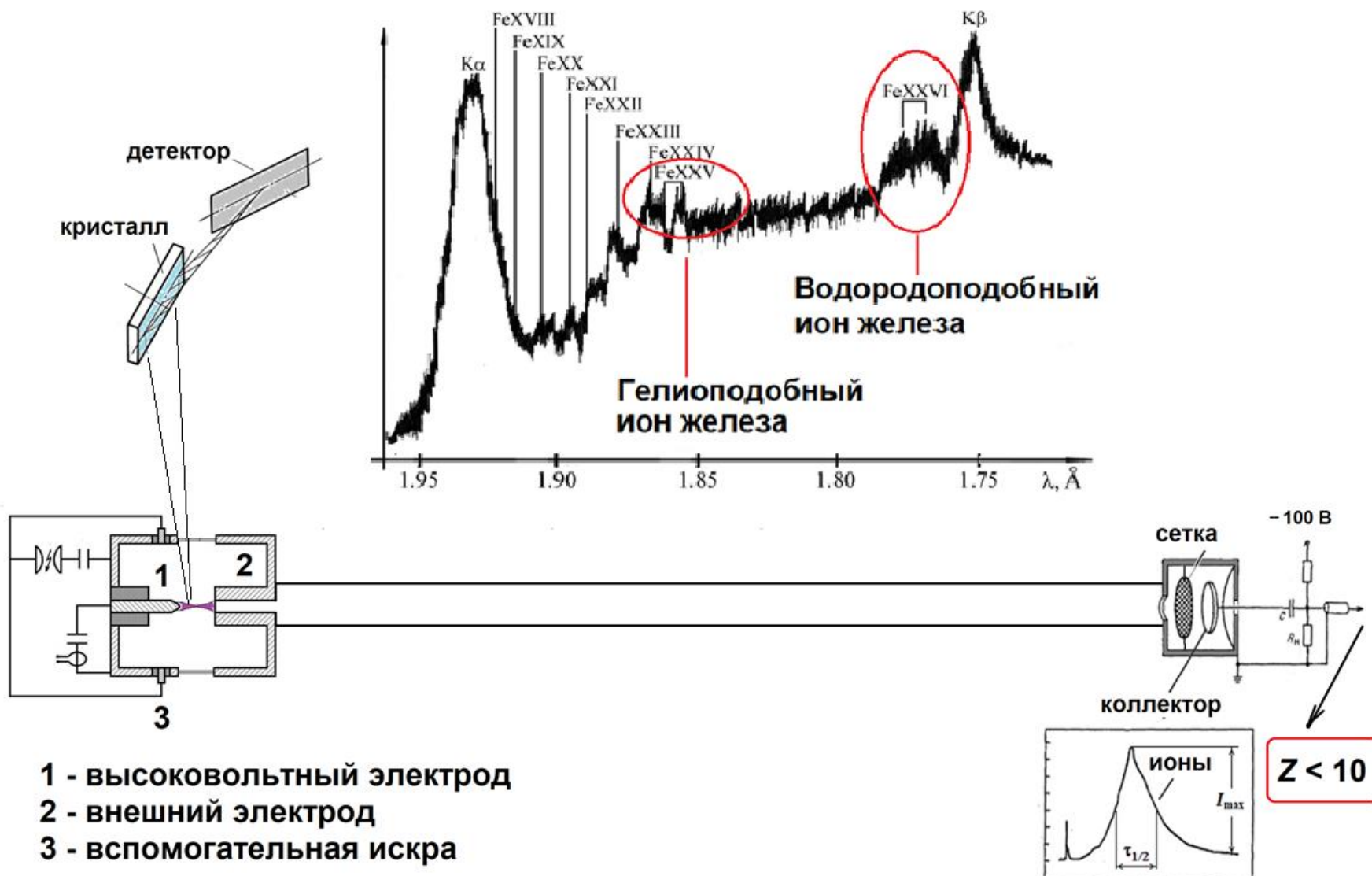
ABSTRACT

Разряды типа НВИ известны с середины XX века. Их отличает простая схема реализации, в которой большой ток достигается за счет уменьшения индуктивности разрядного контура ($I_{\text{макс}} = U_0/\rho$, $\rho = \sqrt{L/C}$)

НВИ в режиме микропинчевания

- ❑ При токах разряда НВИ превышающих критическую величину ($\approx 45\text{--}50$ кА) пинч-эффект приводит к высокой степени сжатия плазмы с образованием одного или нескольких микропинчей».
- ❑ Микропинч («плазменная точка», «горячая точка») – уникальный плазменный объект микронных размеров с высокими концентрацией ($N_e \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$) и температурой ($T_e \approx 10$ кэВ) электронов.
- ❑ Образованию микропинча сопровождается генерацией интенсивного рентгеновского излучения и получением в **разрядном промежутке** *многозарядных ионов* (МЗИ) вплоть до *водородоподобных структур*, что неоднократно подтверждалось с помощью рентгеновской спектроскопии.
- ❑ В эмиссионных спектрах регистрируются быстрые заряженные частицы (электроны и многозарядные ионы), энергии которых могут превышать энергию прямого ускорения в разрядном промежутке.

НВИ в режиме микропинчевания – источник интенсивного рентгена и быстрых многозарядных ионов



Актуальность исследования НВИ – многообразие существующих режимов разряда

Два «полярных» направления развития НВИ

«Медленные» НВИ с большими токами ($I > 100$ кА) и искровым (триггерным) инициированием



Триггер – скользящая искра по поверхности диэлектрика. Простая конструкция, но требующая защиты триггера от высокого напряжения.

НВИ с Fe-электродами

Режим микропинчевания:

- в разряде образуются ионы вплоть до Fe XXVI и Fe XXV.
- в эмиссионных спектрах ионов максимальный заряд $Z < 10$.

«Быстрые» НВИ с высоким dI/dt и лазерным инициированием



Лазерная плазма на электроде. Быстрый ввод аблируемого материала электрода в разрядный промежуток с возможностью изменения его количества.

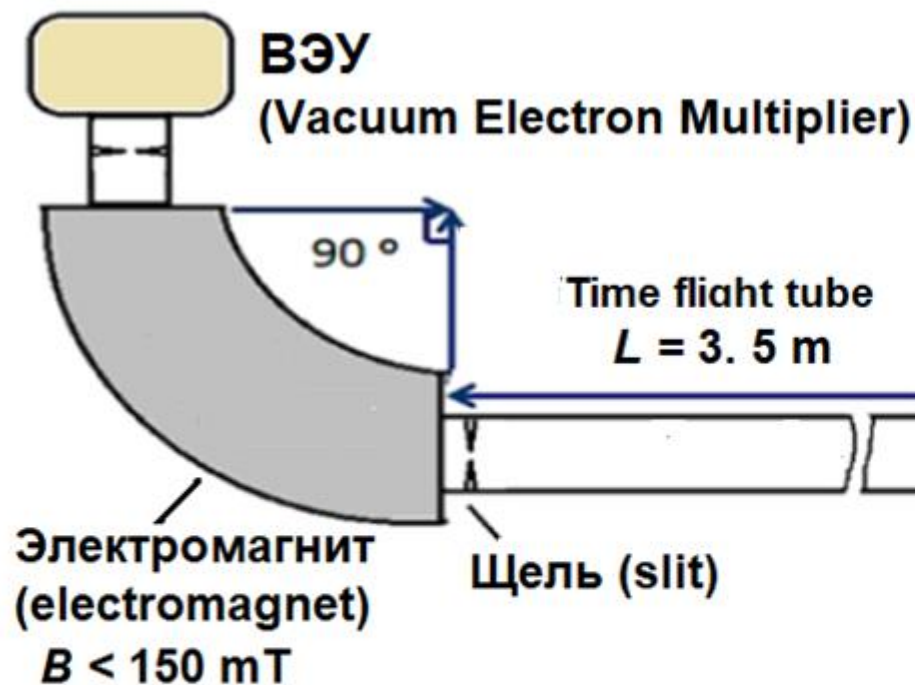
НВИ с Fe-электродами

Докритический режим ($I < 30$ кА):

- в эмиссионных спектрах ионов широкий диапазон заряда $Z = 2 - 18$

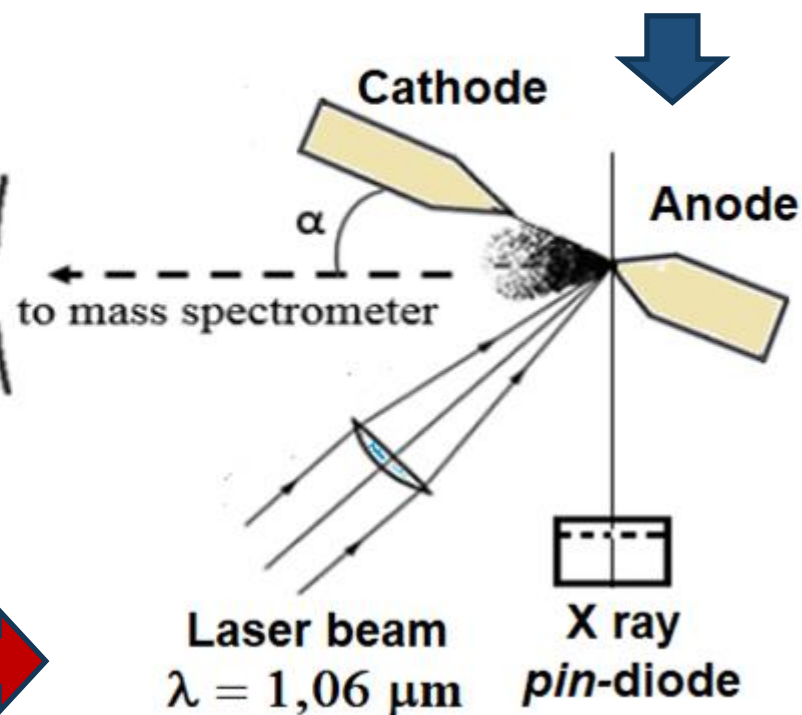


Аллигатор: НВИ с лазерным инициированием и времяпролетный масс-спектрометр

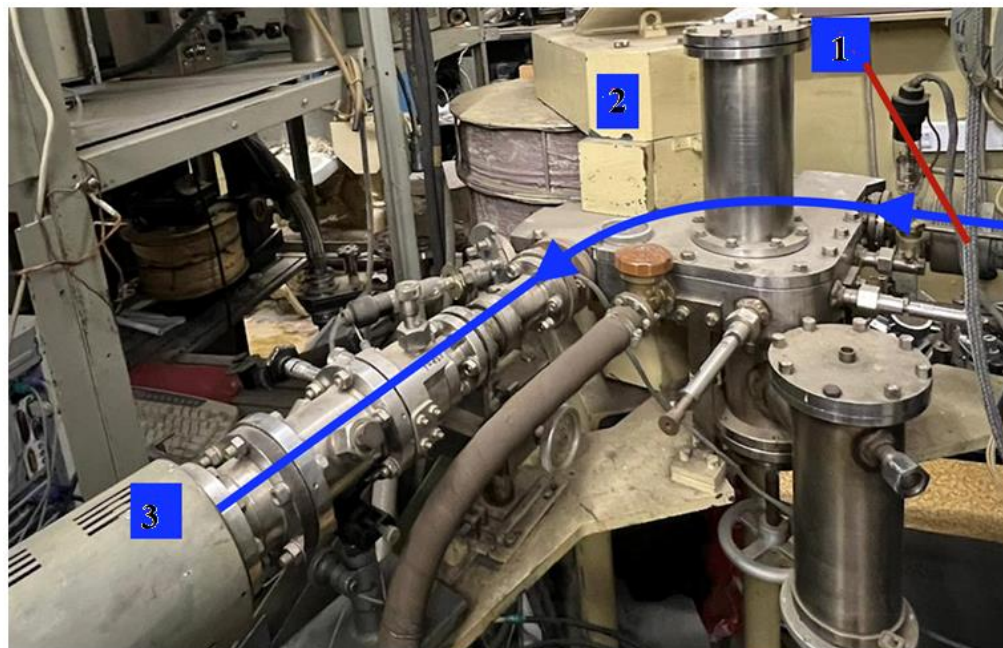


**Nd:YAG лазер,
модулированная добротность
($E_{\text{макс}} < 30 \text{ нДж}$, $\tau \approx 15 \text{ нс}$)**

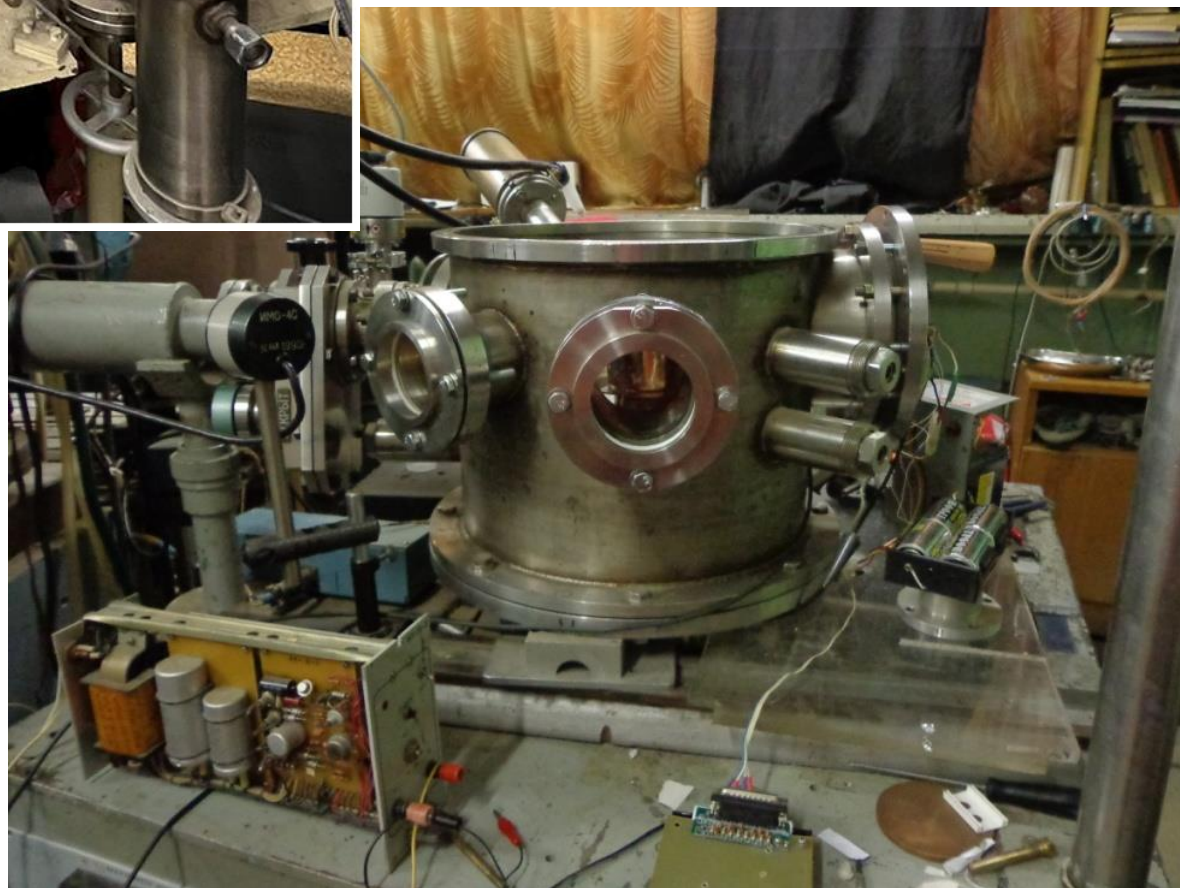
Емкость батареи	0,22 мкФ
Рабочее напряжение	15 кВ
Запасаемая энергия	20 Дж
Ток	10 кА



Аллигатор



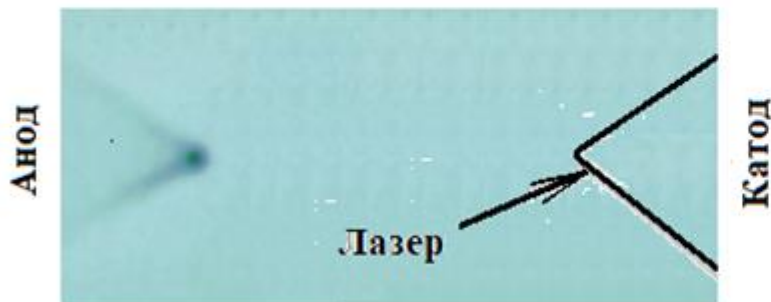
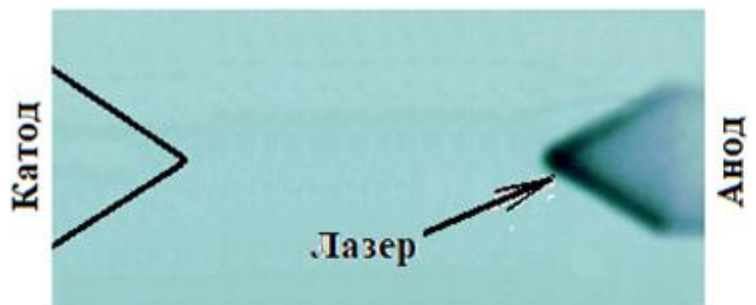
**НВИ с лазерным
иницированием
и
времяпролетный
масс-спектрометр**



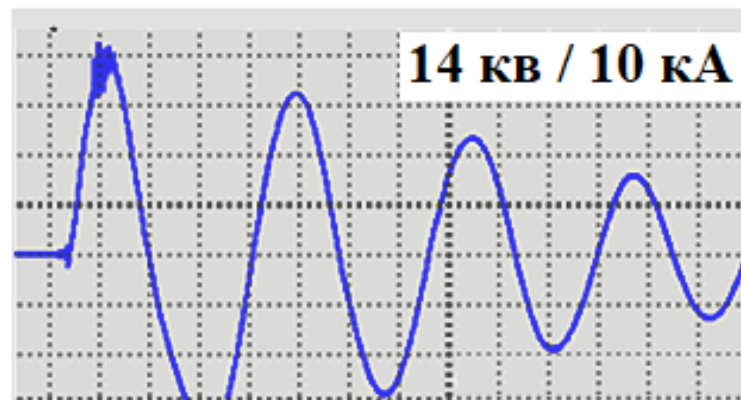


Аллигатор: режимы разряда

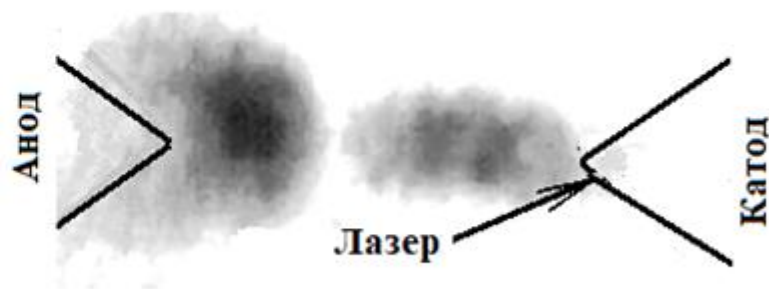
Рентгеновская обскура



а) $h\nu > 10 \text{ кэВ}$



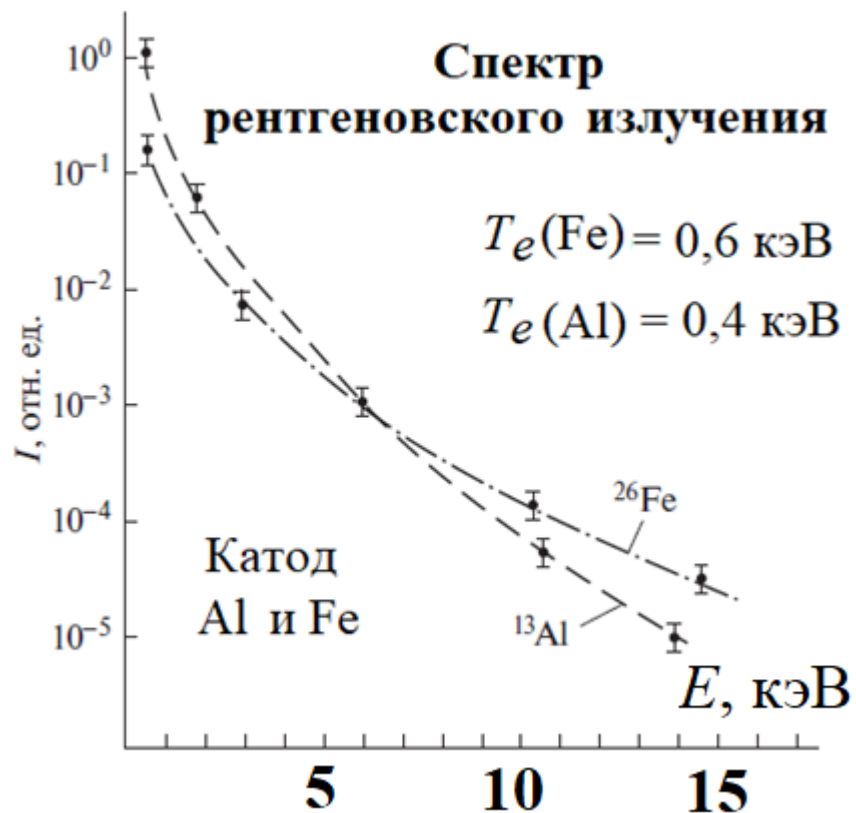
Развертка 250 нс/дел



б) $h\nu > 1 \text{ кэВ}$

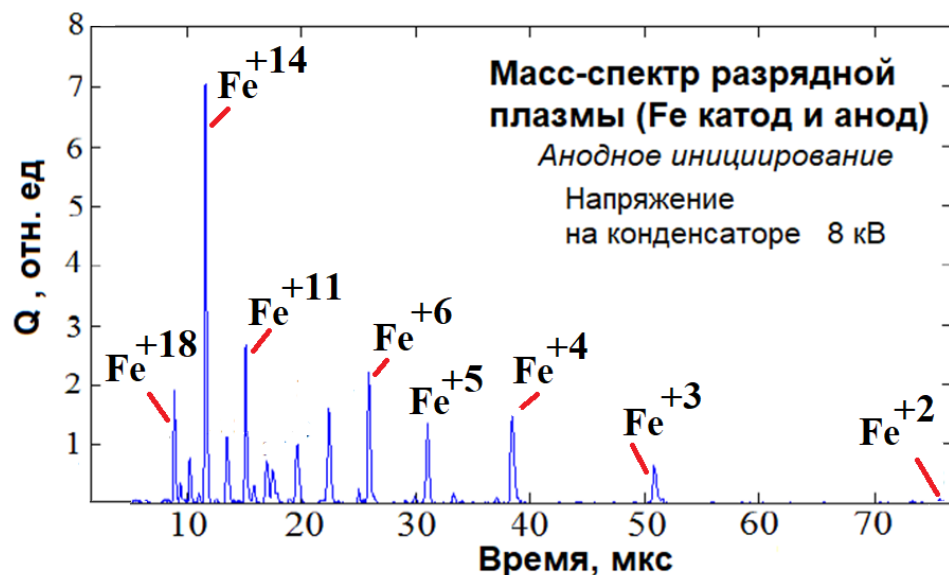


Аллигатор: рентген (ТЛД) и ионы



$$I \sim \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) \Rightarrow kT_e(h\nu) = -\frac{d(h\nu)}{d(\ln I)}$$

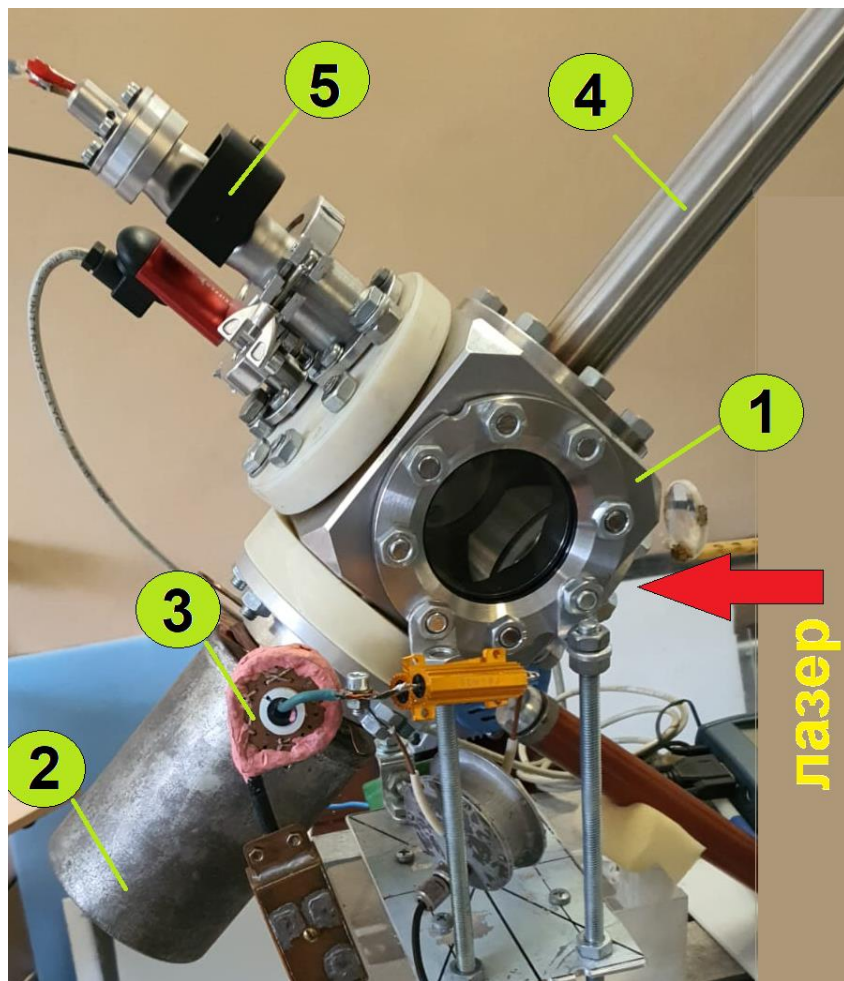
Генерация многозарядных ионов



Установка ПИНЧ

сильноточная НВИ с лазерным инициированием

Направление исследований: разработка компактного лазерно-искрового источника быстрых многозарядных ионов.



Компактная низкоиндуктивная электроразрядная система

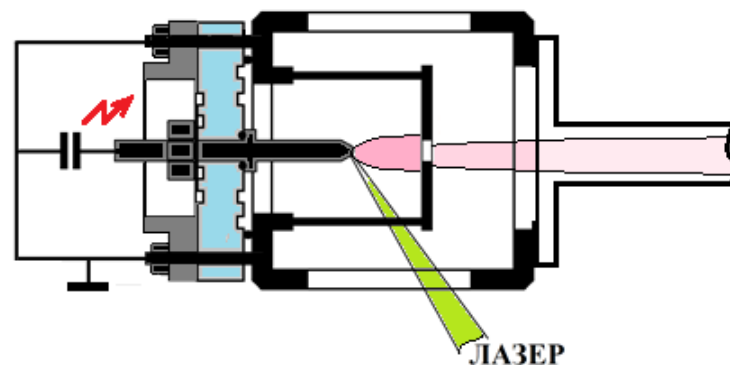
Емкость 0,22 мкФ/25 кВ

Индуктивность 32 + 20 нГн

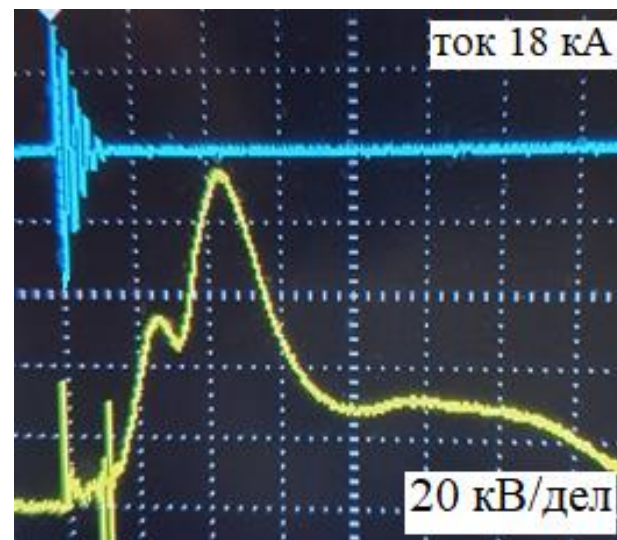
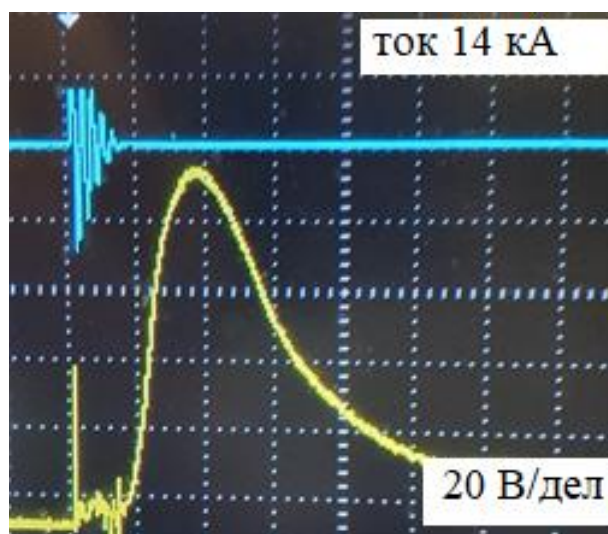
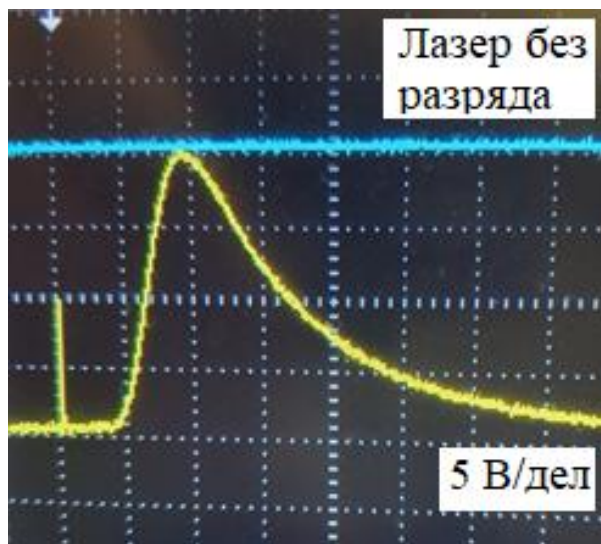
Ток разряда до 40 кА

Напряжение до 23 кВ

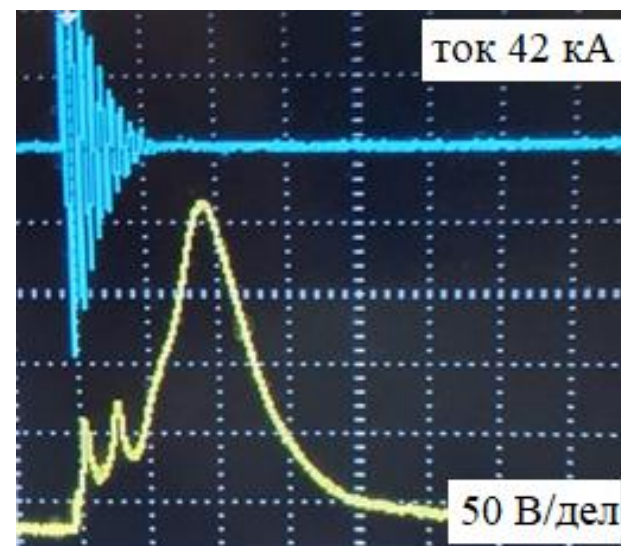
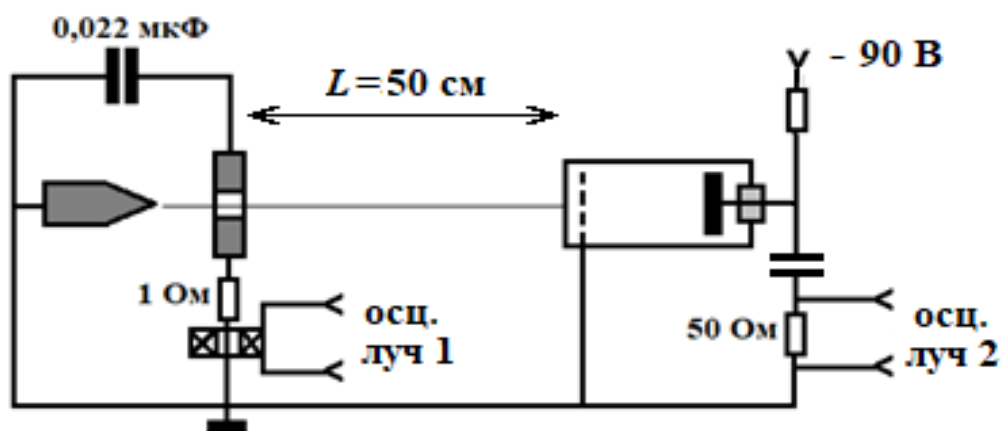
YAG: Nd+3 лазер (300 мДж/10 нс)



Первые результаты на установке ПИНЧ



Развертка 5 мкс/дел



Возможность получения МЗИ при «глубоком» пинчевании

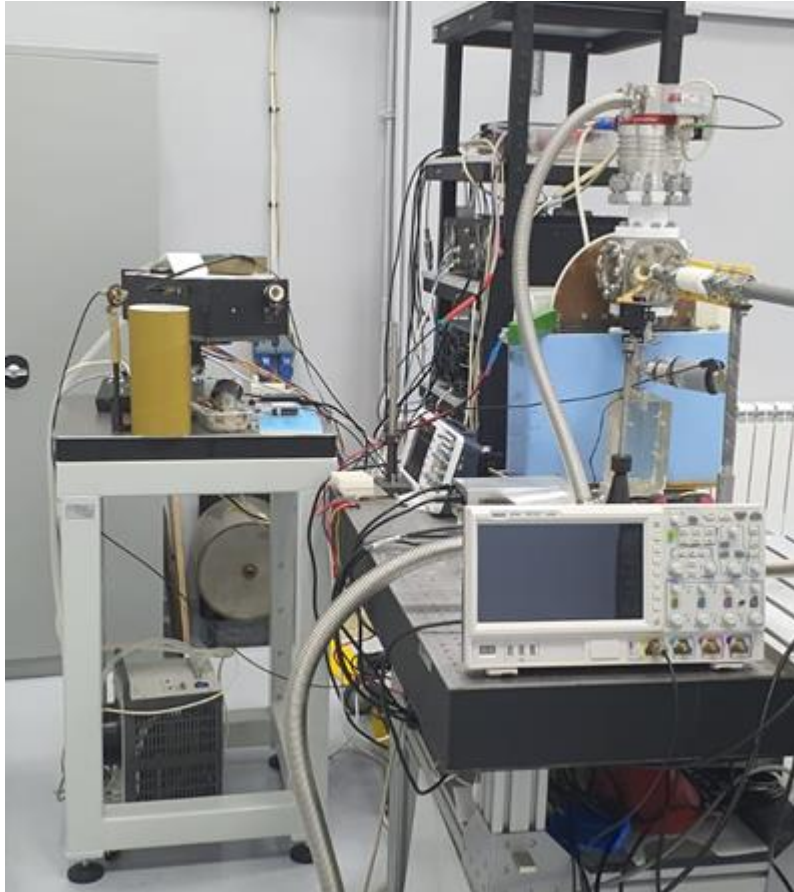
Лазерно-плазменная установка «ПИНЧ» (НВИ с лазерным инициированием)



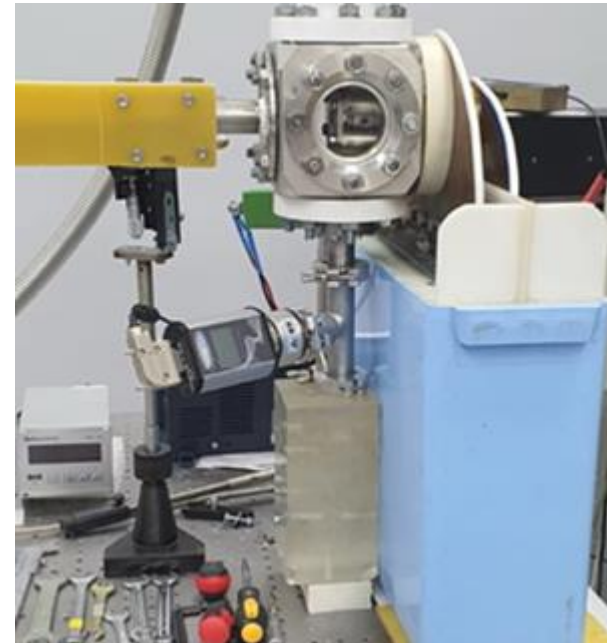
«ПИНЧ» – разряд типа НВИ
с лазерным иницированием



Сильноточный (до 90 кА).
Сверхбыстрый ($di/dt \approx 10^{12} \text{ A/c}$).
Электроды из Со (99,9%).



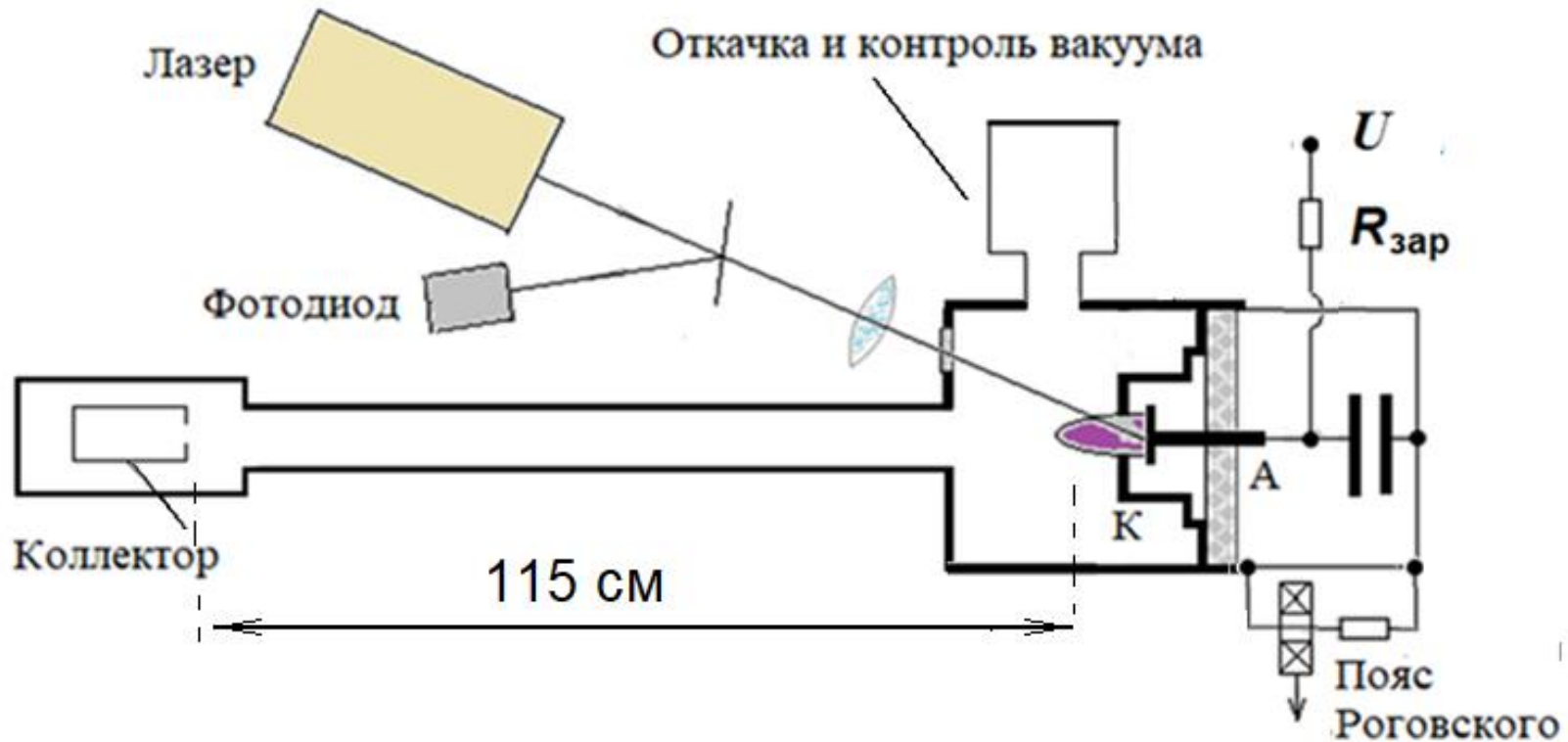
YAG:Nd³⁺ лазер:
энергия $E = 50 \div 500$ мДж,
длительность $\tau \approx 10$ нс.



Разрядный контур:
 $C = 0,6$ мкФ, $L \approx 38$ нГн,
 $\rho \approx 0,25$ Ом.
Давление $P < 10^{-6}$ торр

Анодное и катодное
иницирование разряда

Базовые диагностики на установке «ПИНЧ»



ТОК. Пояс Роговского в режиме трансформатора тока

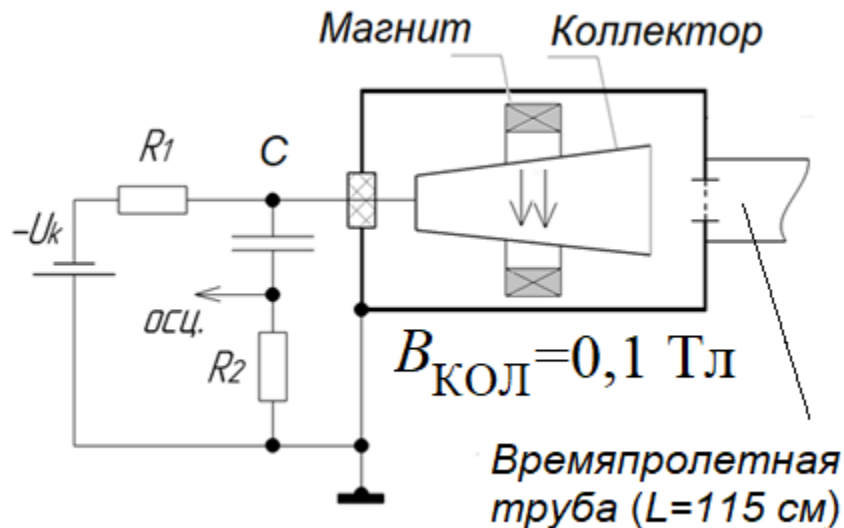
$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = U_p = L_p \frac{di(t)}{dt} + \cancel{i(t) R} \approx L_p \frac{di(t)}{dt}$$

Слабозатухающие колебания тока $I(t) = I_{\text{макс}} \exp\left(-\frac{R}{2L} t\right)$



КОЛЛЕКТОР. Выполнен в виде цилиндра Фарадея помещался в камеру с остаточным давлением 8×10^{-7} торр.

Регистрация ионов с помощью времяпролетных коллекторных измерений



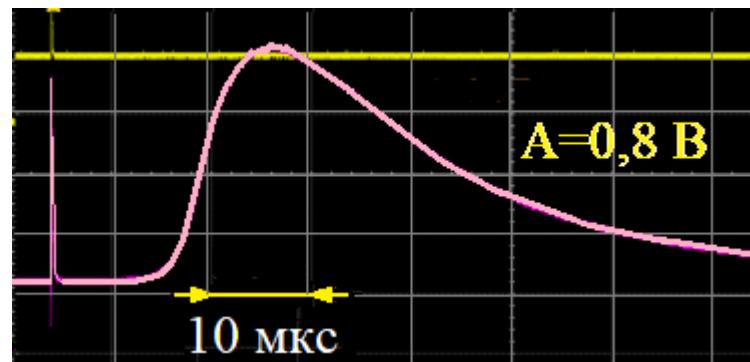
Для подавления электронной компоненты применялось поперечное магнитное поле $B_{КОЛ} = 0,1$ Тл.

Группа медленных ионов

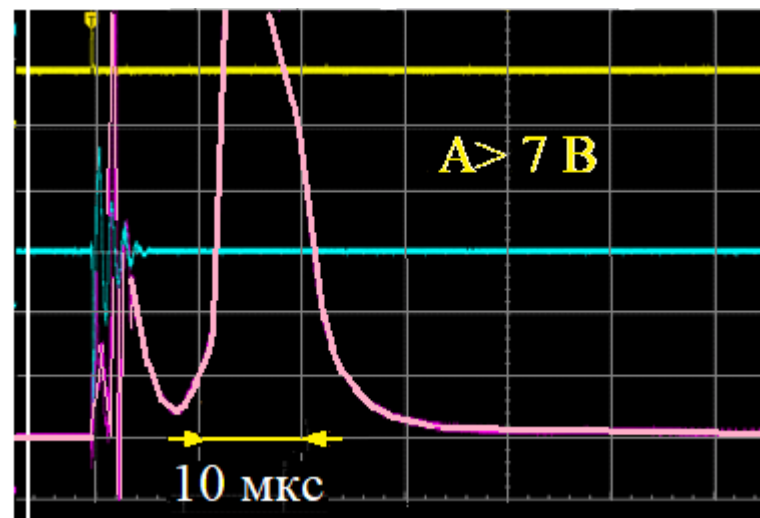
$U = 0 \rightarrow A = 0.8$ В

$U = 5$ кВ $\rightarrow A > 7$ В

Скорость $v \approx 10^7$ см/с



Импульс с коллектора ионов
без напряжения ($U = 0$)



Импульс с коллектора ионов
при $U = 5$ кВ

Установка «ПИНЧ». ДИАГНОСТИКИ

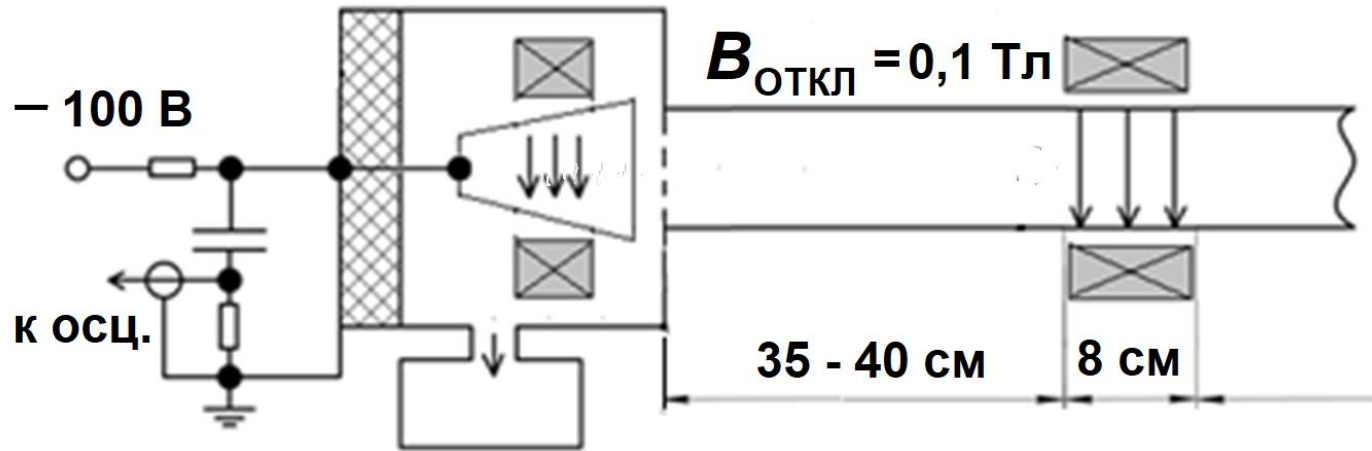


Развертка 500 нс/дел

1. Фотоэлектрическая регистрация лазерного импульса (фотодиод).
2. Регистрация поведения тока с помощью пояса Роговского
3. Регистрация сигнала с коллектора (цилиндр Фарадея)

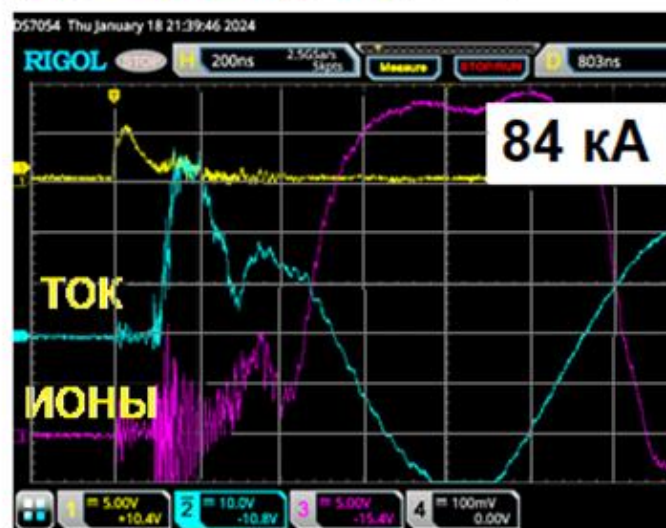
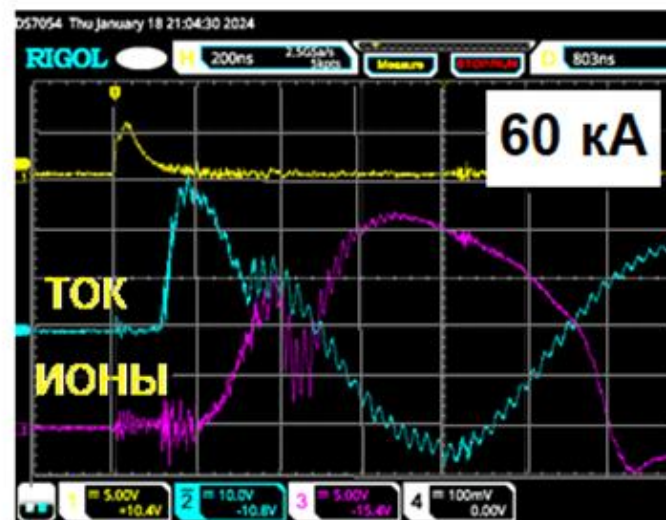
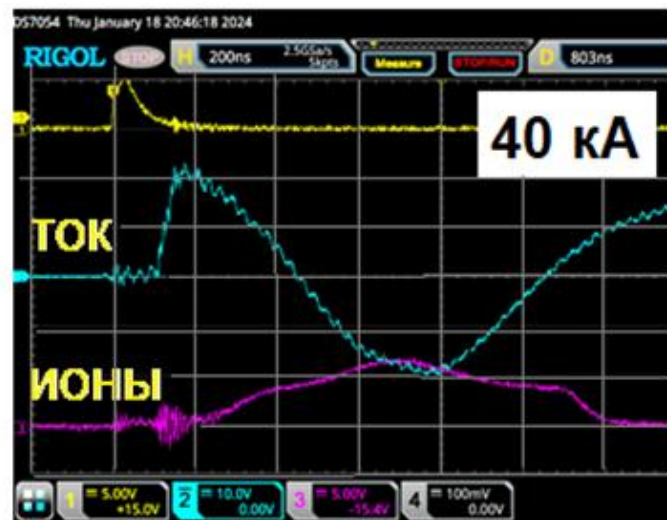
Модификация времяпролетной диагностики

Ключевой проблемой является присутствие в пучке легких ионов (в первую очередь водорода)



- ❑ Для отклонения легких ионов от входной апертуры коллектора применено поперечное отклоняющее поле.
- ❑ Расчет удаления от коллектора выполнен для поля $B_{\text{откл}} = 0,1\text{ Тл}$ и быстрой компоненты ионов водорода с энергиями до 300 кэВ .

Регистрация тока и коллекторные измерения быстрых ионов Со при анодном иницировании



Развертка 200 нс/дел, $E_{\text{ЛАЗ}} = 150$ мДж

Регистрация тока и коллекторные измерения быстрых ионов (катодное инициирование)



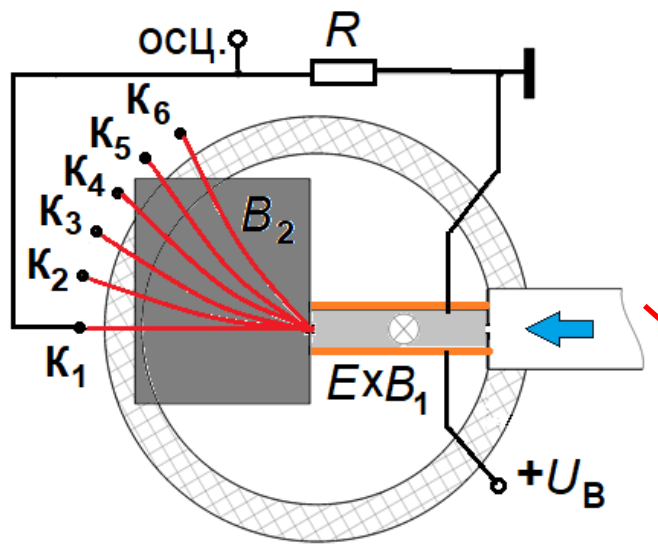
Развертка 200 нс/дел, $E_{\text{ЛАЗ}}$ = 150 мДж

- Пинч 1 – сжатие катодной струи плазмы при росте тока.
- Пинч 2 – глубокое сжатие плазмы, при котором образуются быстрые многозарядные ионы.
- Первая группа ионов – наиболее быстрые многозарядные ионы Co

Анализ коллекторных измерений

1. Ток достигает максимальной величины за время $\tau \sim 50 - 60$ нс при анодном инициировании (АИ) и $\tau \sim 100 - 120$ нс при катодном инициировании (КИ), причем скорость dI/dt выше по сравнению с синусоидальной формой.
2. Задержка тока относительно лазерного импульса меньше при катодном инициировании, и $t_{3(КИ)} = 80$ нс $<$ $t_{3(АИ)} = 120$ нс.
3. Ионов больше при катодном инициировании за счет эмиссии с анода.
4. При превышении порога пинчевания ($I_p \approx 50$ кА) увеличивается доля быстрых ионов с характерной скоростью, превышающей $\approx 10^8$ см/с и суммарным зарядом $\sim 10^{-9}$ кулон (10^{10} ионов).
5. Формирование провалов и выбросов на особенности тока имеет нерегулярный характер, что приводит к разбросу в эмиссионных спектрах ионов.
6. Надежной идентификации быстрых МЗИ кобальта (первые 400 нс) мешает присутствие в коллекторном сигнале фотопиков.

Масс-спектрометр и фильтр Вина

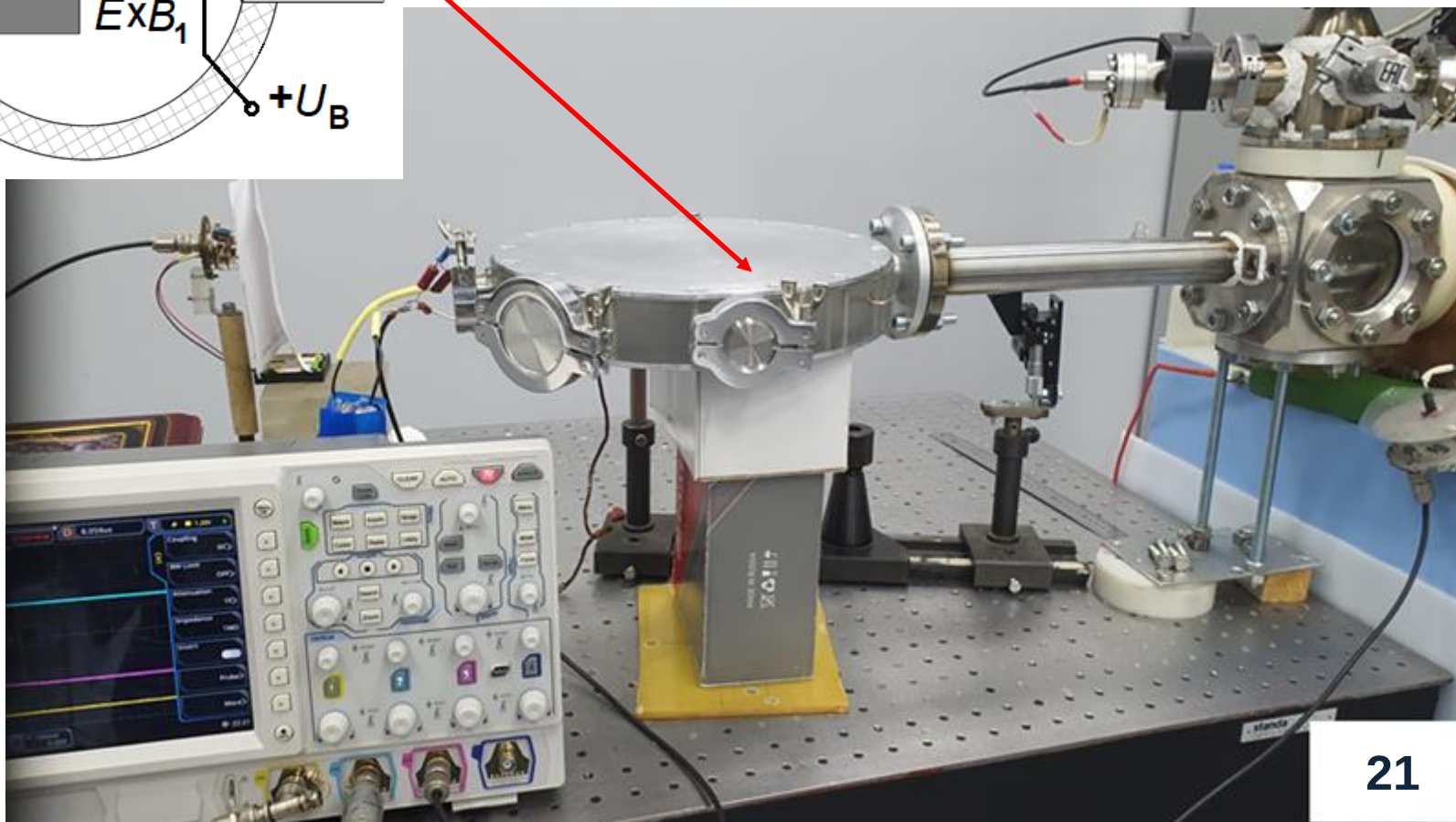


Фильтр Вина – селекция по скорости

$$V = E/B_1.$$

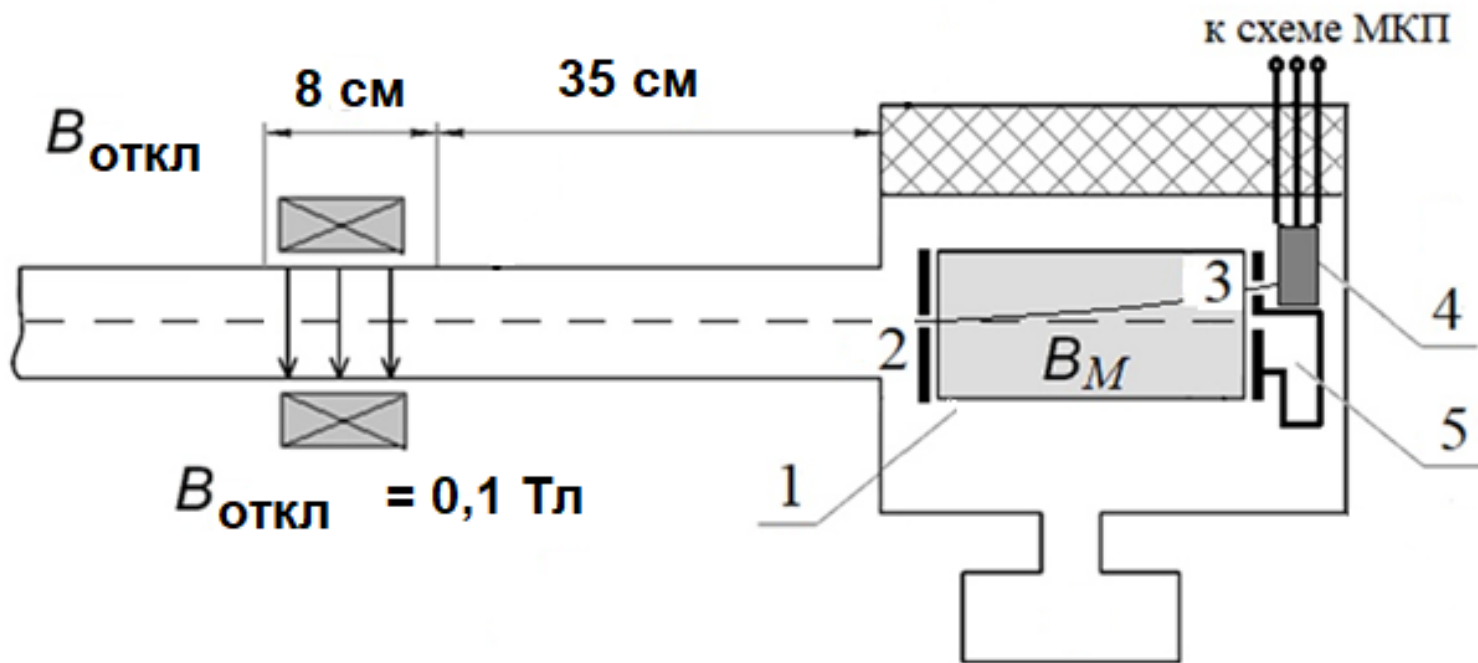
Масс-спектрометр – движение по радиусам

$$R = mV/qB_2$$



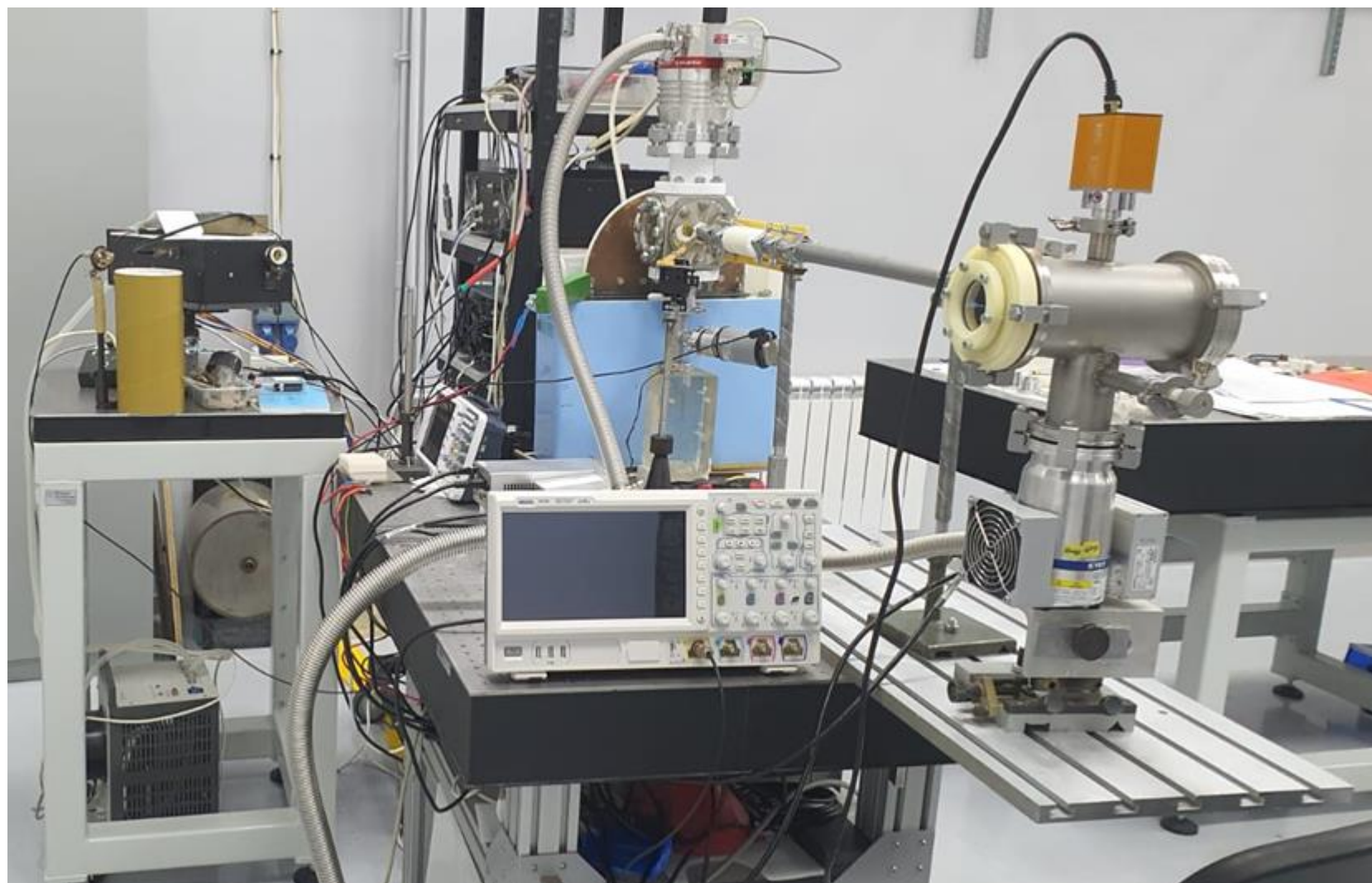
Времяпролетная диагностика ионов с магнитным масс-спектрометром и МКП детектором

Выполнены расчеты и разработан проект компактного магнитного масс-спектрометра, оптимизированного под эксперимент для регистрации ионов кобальта с зарядностью $Z = 10 \div 20$ и скоростями выше 10^8 см/с

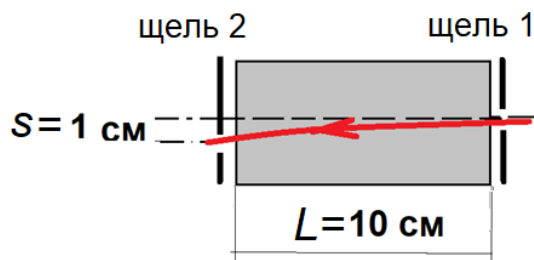
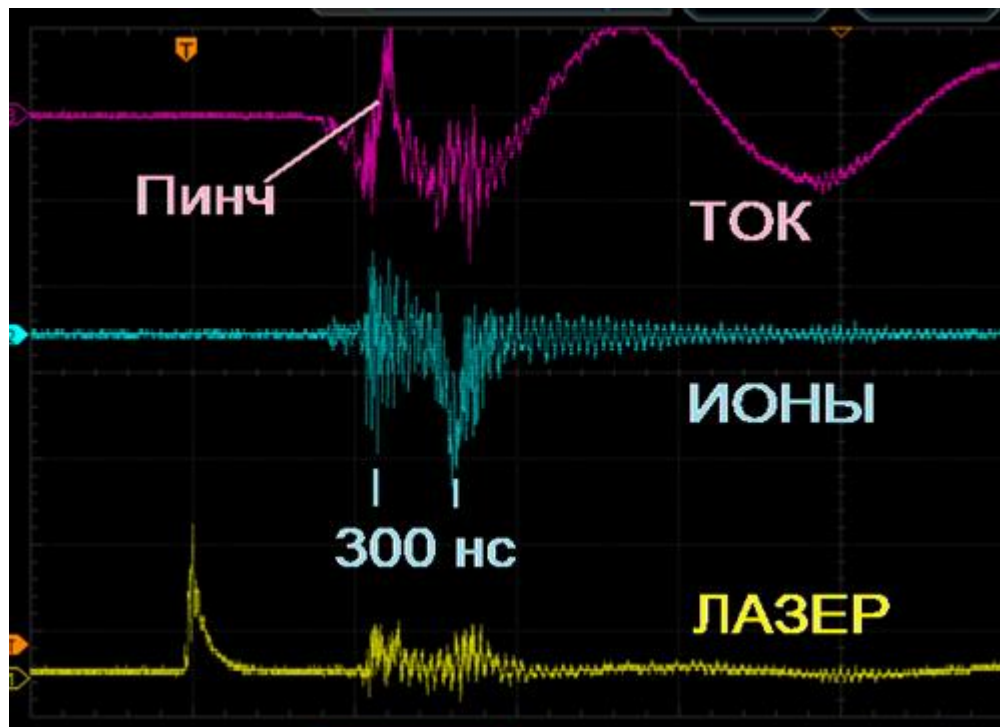
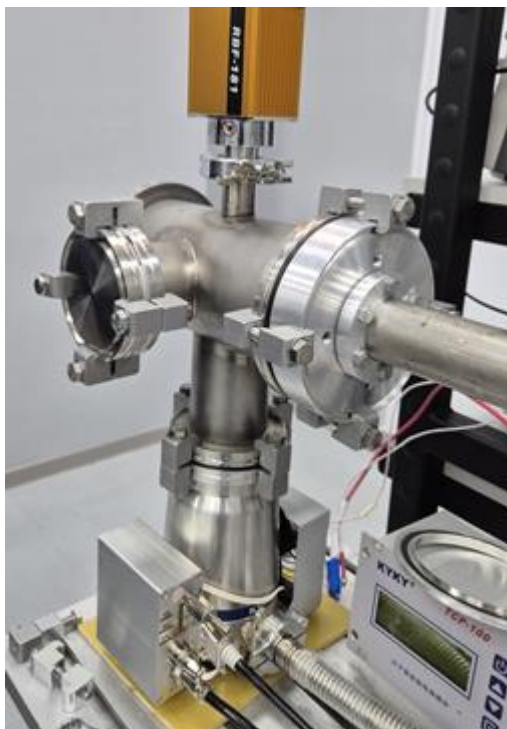


1 – два постоянных $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ магнита (20 x 50 x 100 мм, $B_M \leq 1,0$ Тл ;
2 и 3 – входная и выходная щели (0,1 x 10 мм); 4 – детектор ионов на основе микроканальной пластины (МКП); 5 – ловушка для фотонов;

Времяпролетная диагностика ионов с магнитным масс-спектрометром и МКП детектором



Времяпролетная диагностика ионов с магнитным масс-спектрометром и МКП детектором



- 1. Щели расположены на окружности $R = 50 \text{ см}$.
- 2. Время 300 нс на пролетной длине 1,25 м дает скорость $4,2 \times 10^6 \text{ м/с}$.
- 3. Поле $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ магнита $B = 0,45 \text{ Тл}$.
- 4. Оценка заряда для ионов кобальта с атомной массой $A = 59$ дает $Z = \frac{Mv}{ReB} \approx 11$

Оценка скорости и времени пролета МЗИ Со, регистрируемых МКП

Исходные данные: многозарядные ионы кобальта ($Z=10\div 20$), индукция магнитного поля $B_M = 0,45$ Тл, расстояния между щелями спектрометра 10 см,

Ионы	Скорость v , см/с	Время пролета τ , нс
Co ⁺¹⁰	2.11×10^8	592
Co ⁺¹¹	2.32×10^8	539
Co ⁺¹²	2.53×10^8	494
Co ⁺¹³	2.74×10^8	456
Co ⁺¹⁴	2.95×10^8	424
Co ⁺¹⁵	3.17×10^8	394
Co ⁺¹⁶	3.38×10^8	370
Co ⁺¹⁷	3.59×10^8	348
Co ⁺¹⁸	3.80×10^8	329
Co ⁺¹⁹	4.01×10^8	312
Co ⁺²⁰	4.22×10^8	296
H ⁺¹	12.5×10^8	100



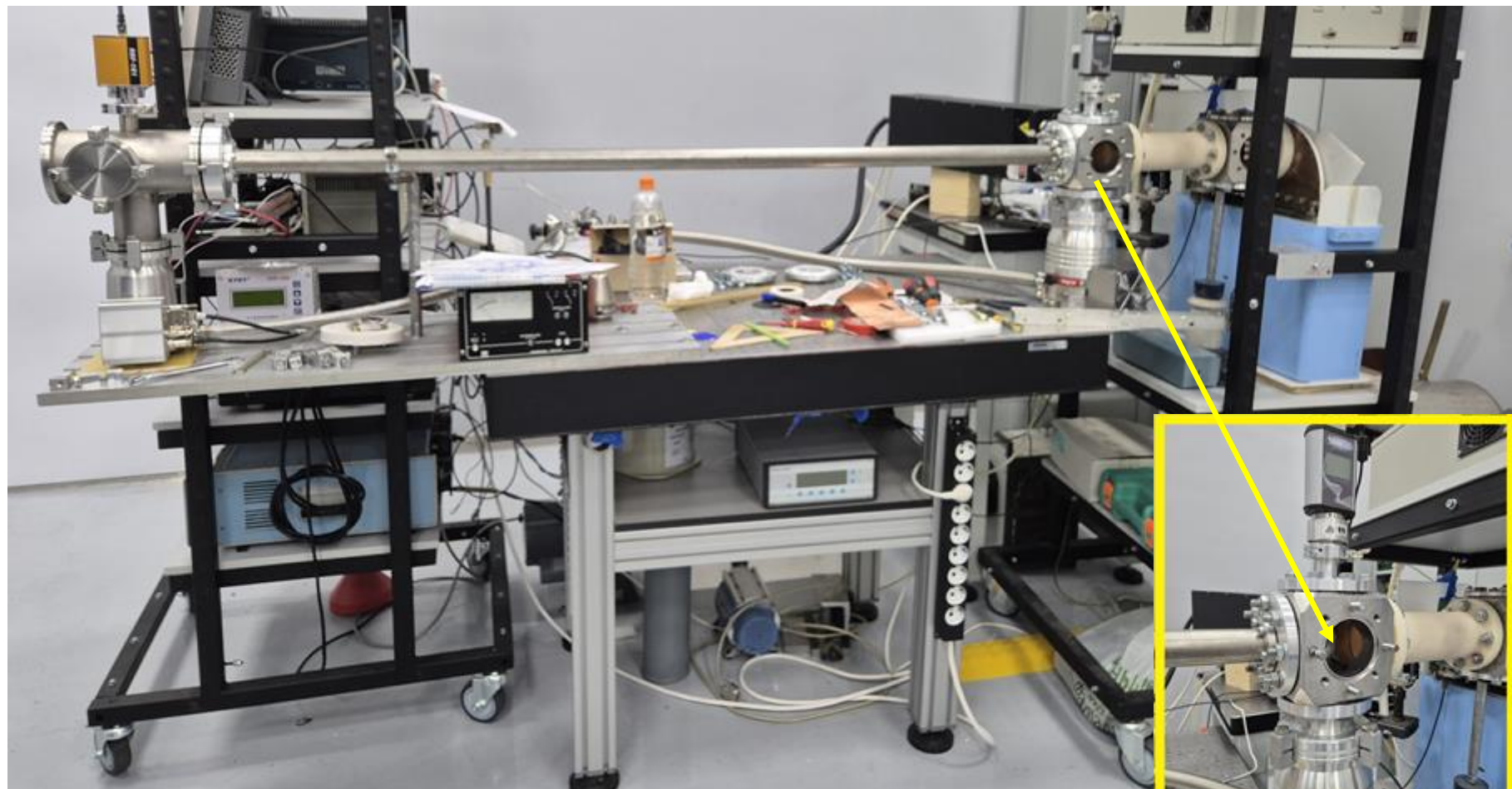
Радиус $R = 27$ см

**Продольный размер
магнитного поля
 $L = 10$ см**

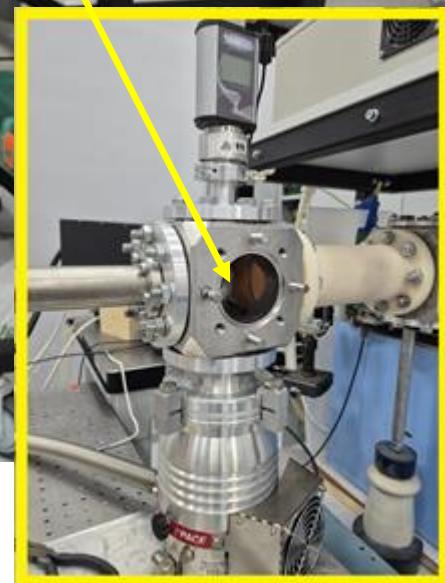


**Поперечное
смещение щелей
 $s = 2$ см**

Лазерно-плазменная установка «ПИНЧ» (после последней модернизации)



Длина времяпролетной базы увеличена до 2-х метров.
Давление в трубе не хуже 10^{-6} торр.
Разрядный ток до 100 кА при напряжении 25 кВ.



Заключение

1. Проведено экспериментальное исследование потоков ионов, образующихся при пинчевании сверхбыстрого сильноточного разряда в лазерной плазме, инициируемой на внутреннем высоковольтном электроде в режимах с анодным и катодным инициированием.
2. С помощью времяпролетной коллекторной методики зарегистрировано до 10^{10} ионов кобальта за один импульс в телесный угол 0,04 рад со средней скоростью $(3 \div 6) \times 10^8$ см/с, что соответствует энергиям $2 \div 8$ МэВ.
3. Разработан и апробирован компактный магнитный масс-спектрометр, оптимизированный под эксперимент для регистрации ионов кобальта с зарядностью $Z = 10 \div 20$ и скоростями выше 10^8 см/с.

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**