



XVI Международная конференция «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»  
ЗНЧ-2023

**ВАКУУМНАЯ ИСКРА С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ.  
ДИАГНОСТИКА И ПРИМЕНЕНИЯ**

*Е. Д. Вовченко, И.А. Герасимов, Д. И. А.П. Мелехов, Р.Ш. Рамакоти,  
К. И. Козловский, А.С. Савелов, А.Е. Шиканов, Э.Я. Школьников*

**VACUUM SPARK WITH LASER INITIATION.  
DIAGNOSIS AND APPLICATIONS**

*E.D. Vovchenko, I.A. Gerasimov, A.P. Melekhov, R.Sh. Ramakoti,  
K.I. Kozlovskii, A.S. Savjолоv, A.E. Shikanov, E.Ya. Shkolnikov*  
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia



# Институт лазерных и плазменных технологий

Е. Д. Вовченко, И.А. Герасимов,  
Д. И. А.П. Мелехов, Р.Ш. Рамакоти,  
К. И. Козловский

**КАФЕДРА**  
**Физика лазерного термоядерного синтеза**

А.С. Савелов

**КАФЕДРА**  
**Физика плазмы**

А.Е. Шиканов

**КАФЕДРА**  
**Электрофизические установки**

Э.Я. Школьников

**КАФЕДРА**  
**Электротехника**  
**(Мощная импульсная электрофизика)**

# Высоковольтный искровой разряд (High voltage spark discharge)



Роберт Эндрюс Милликен  
(Нобелевская премия по  
физике 1923 год)

## ВАКУУМНЫЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯД. 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

## Низкоиндуктивная вакуумная искра (low-inductance vacuum spark)



1966, Эдлен Б. Измерение длин волн в вакуумной ультрафиолетовой области спектра / УФН Т. 89, вып. 3, с. 483–510.

1968, Cohen L., Feldman U., Swartz M. and Underwood J. H. Study of the X-Rays Produced by a Vacuum Spark / J. of the Optical Society of America Vol. 58, Issue 6, pp. 843–846

На смену высоковольтным схемам с напряжениями  $\geq 100$  кВ пришли схемы с рабочим напряжением 20 – 50 кВ, в которых за счет уменьшения индуктивности разрядного контура достигалась более высокая мгновенная сила тока в разряде.



### «Низкоиндуктивная вакуумная искра»

1. *Получение многозарядных ионов*
2. *Генерация излучения с  $\lambda < 50$  нм*

«Плазменная точка» – сверхплотное высокотемпературное плазмо-образование микронных размеров, представляющее собой интенсивный источник XR, EUV, UV излучения и потоков заряженных частиц.

# Плотная горячая плазма (Dense hot plasma)



**Генерация ПТ в сильноточных  
разрядах типа Z-пинч**



*Мощные сильноточные НВИ  
с триггерным инициированием*

**Лазерная плазма (ЛП)**



*Бестоковая плазменная струя,  
образующаяся при облучении  
мишени лазерным импульсом*

**Получение горячей плазмы требует больших энергетических затрат**

**НВИ + ЛП**  **лазерно-индуцируемый искровой разряд**

**НВИ – два направления: схемы с триггерным и лазерным инициированием**

# ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРУЕМЫЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯД (LASER-INDUCED SPARK DISCHARGE)



## Сильноточные НВИ

Накопительная емкость	19 мкФ
Рабочее напряжение	12 кВ
Индуктивность контура	40 нГн
Ток разряда	260 кА
Время нарастания тока	1,4 мкс
Рубиновый лазер (5 Дж, 35 нс)	

## Плазменная точка

Ионы Fe XXVI и Fe XXV
Концентрация $N_e = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$
Температура $4 \text{ keV} < T_e < 7 \text{ keV}$

1979, Negus C.R., Peacock N.J. Local regions of high-pressure plasma in a vacuum spark / J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 12, № 1, pp. 91–112

## «Быстрые» НВИ с током до 10 кА

Накопительная емкость	4,7–100 нФ
Рабочее напряжение	20 кВ
Индуктивность контура	100–200 нГн
Ток разряда	3–10 кА
Время нарастания тока	0,35 мкс
Nd лазер (0,5 Дж, 30 пс)	

## Ионы $Al^{7+}$ с энергией до 250 кэВ

## Рентген 0.1 – 10 кэВ

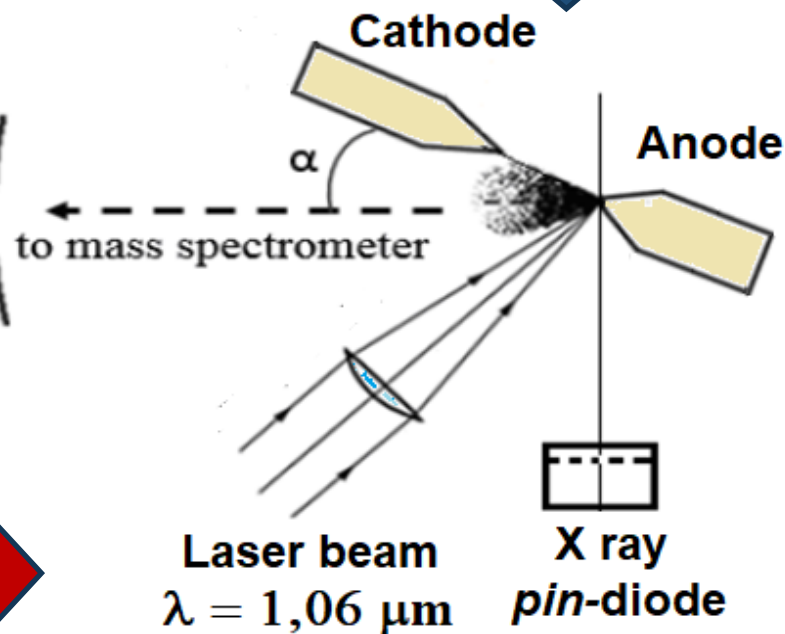
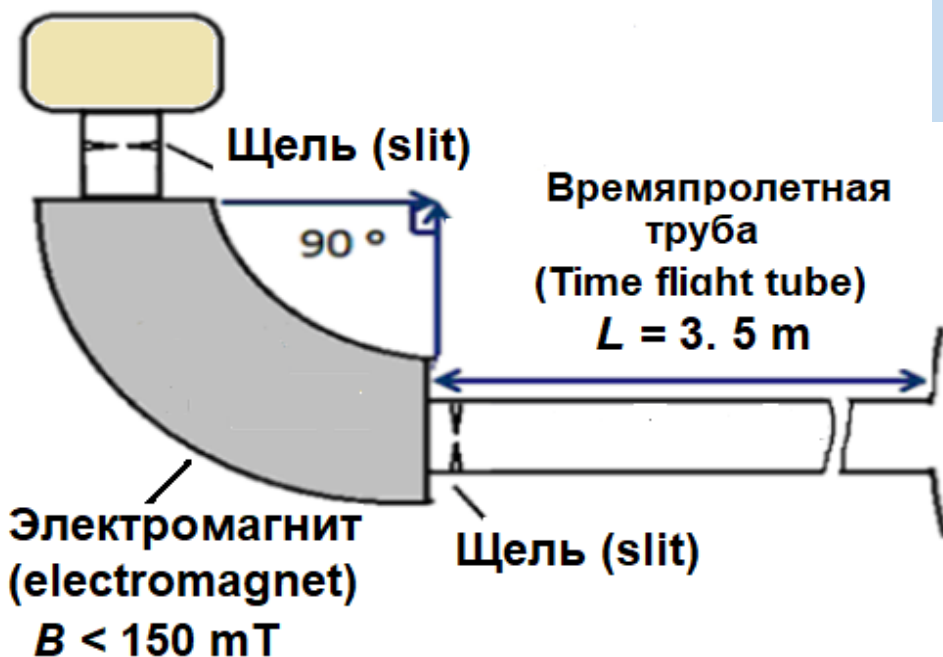
2005-2016, Коробкин Ю.В., Рупасов А.А., Паперный В.Л. и др.  
ЖТФ (2005). Т. 75, № 9, С. 34–39.  
Plas.Phys.Control.Fus, (2008) 50, p.14  
Письма в ЖТФ (2016), 42(3), С. 97–105.

# Аллигатор: времяпролетный масс-спектрометр + вакуумный искровой разряд с лазерным инициированием



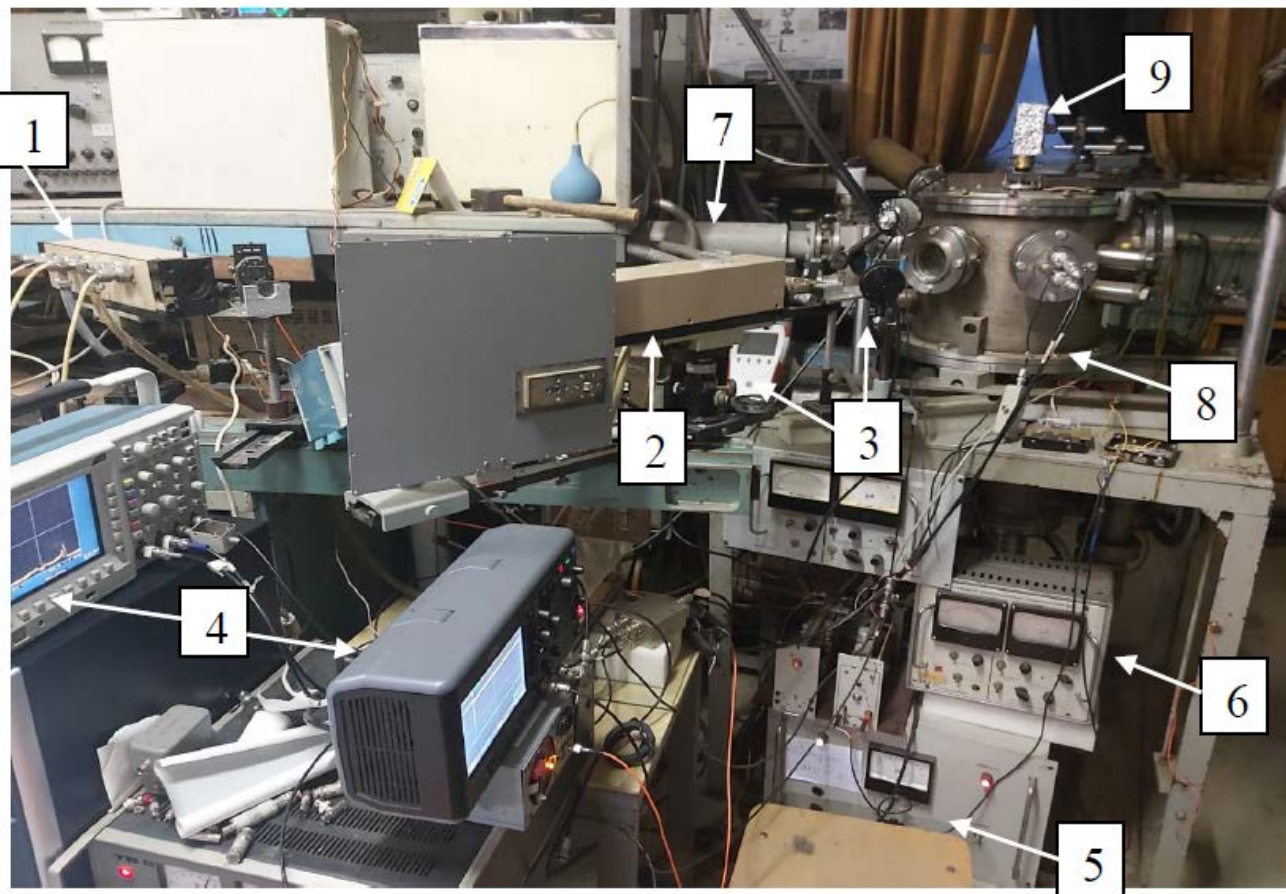
**ВЭУ**  
(Vacuum Electron Multiplier)

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



**Nd:YAG лазер,**  
**модулированная добротность**  
**( $E \leq 30 \text{ мДж}$ ,  $\tau \approx 15 \text{ нс}$ )**

# Аллигатор: времяпролетный масс-спектрометр + вакуумный искровой разряд с лазерным инициированием

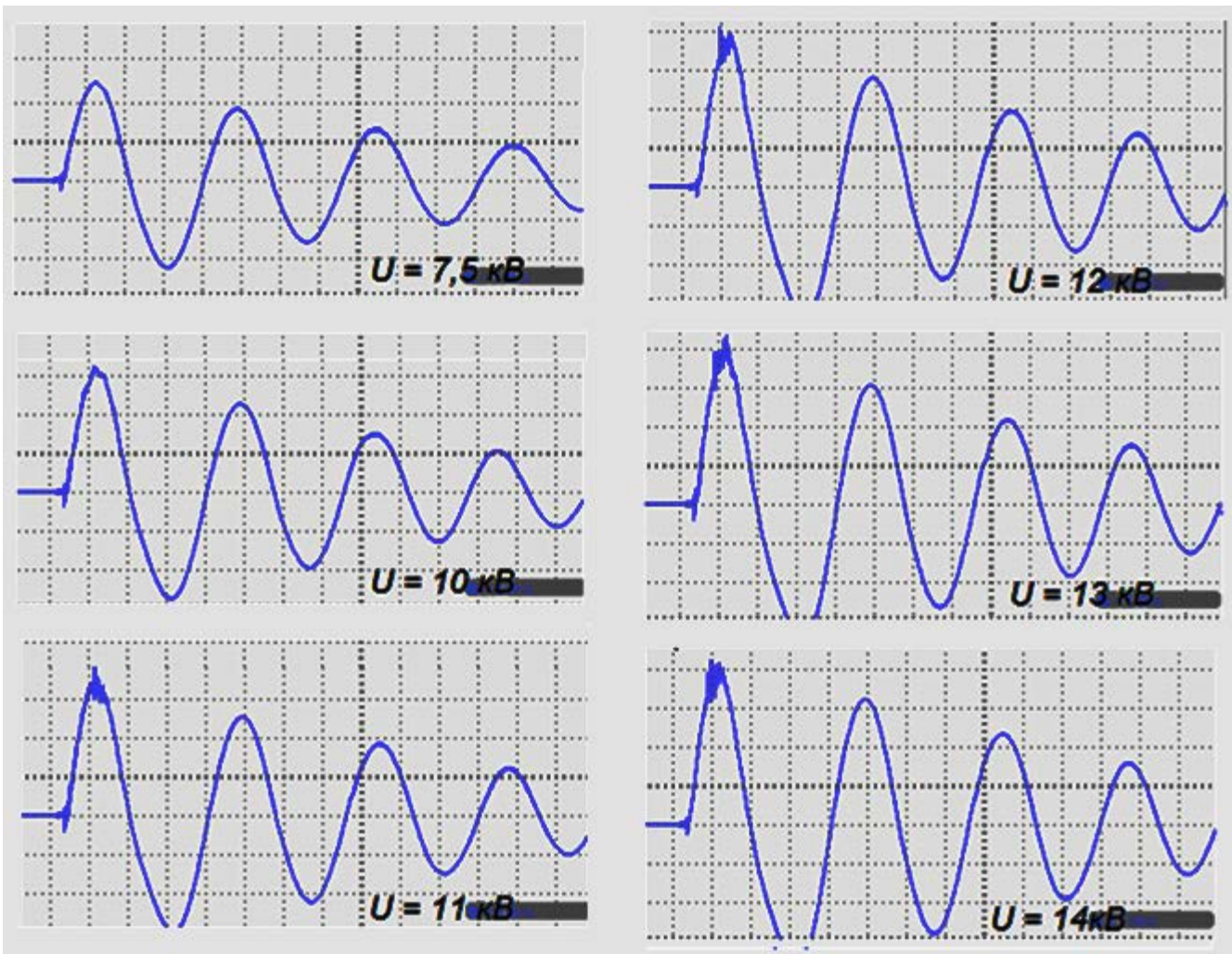


## Внешний вид установки Аллигатор

1. Nd:YAG лазер
2. Лазерный усилитель
3. Контроль энергии
4. Цифровая регистрация
5. НОРД – 250
6. Форвакуумный насос
7. Времяпролетная труба
8. Вакуумная камера
9. Вывод излучения



# Аллигатор: первичная диагностика – электрические измерения



**Пояс Роговского  
в режиме  
трансформатора  
тока**



**Ток разряда**

**Чувствительность  
2,5 кА/дел**

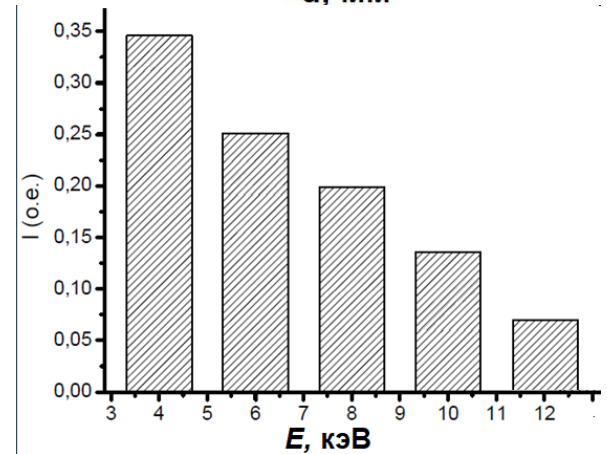
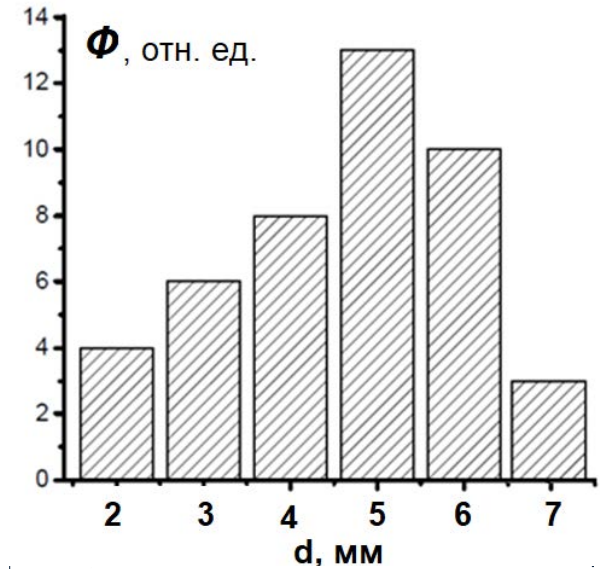
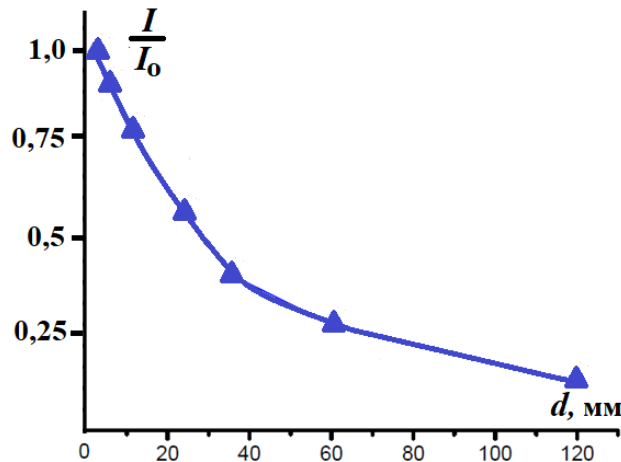
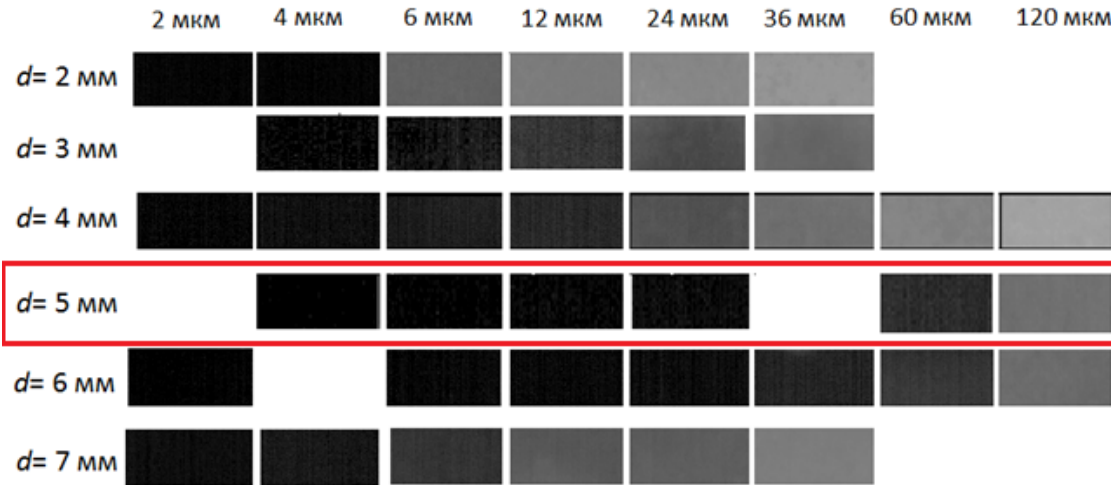
**Развертка  
250 нс/дел**

**«Особенность» тока  
при  $U > 10 \text{ кВ}$**

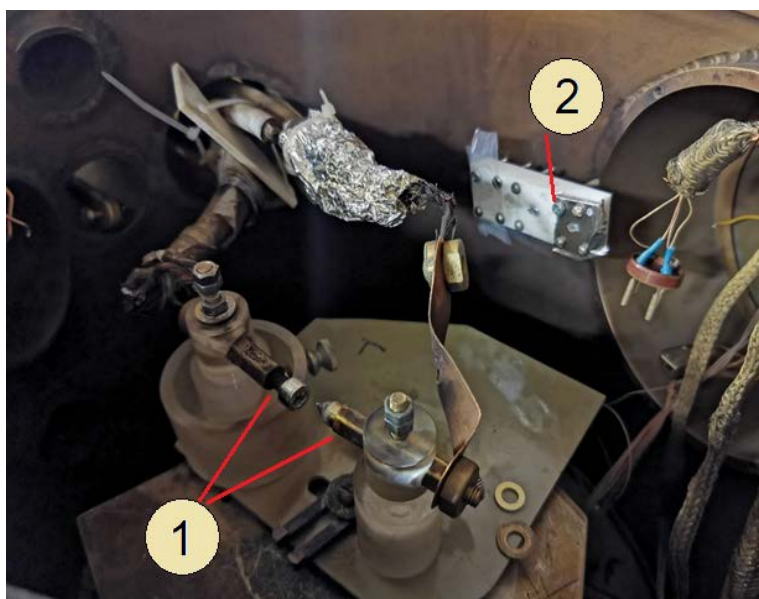
# Аллигатор: спектральный состав рентгена – метод поглощающих фильтров



Толщина Al фильтра (мкм)

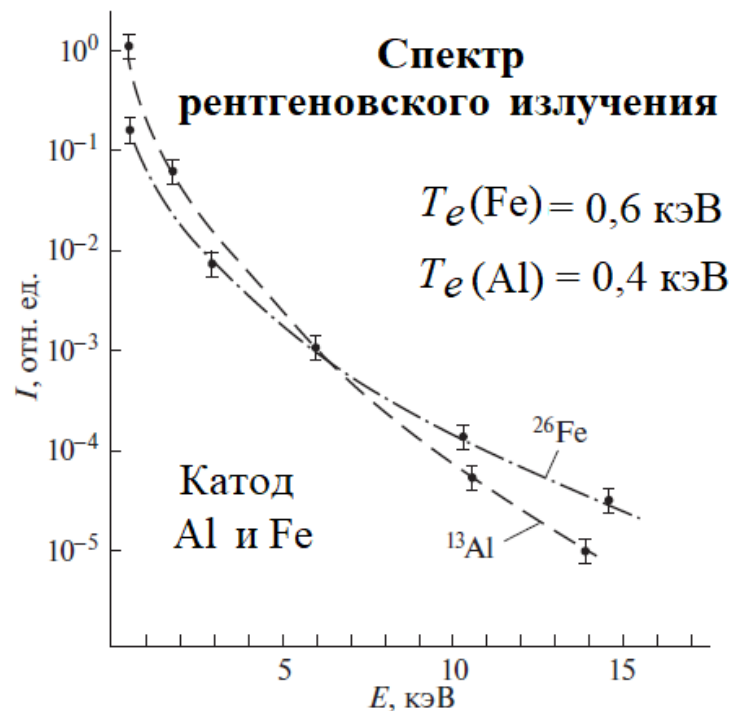


## Измерение энергетического спектра МРИ с помощью термолюминесцентных детекторов



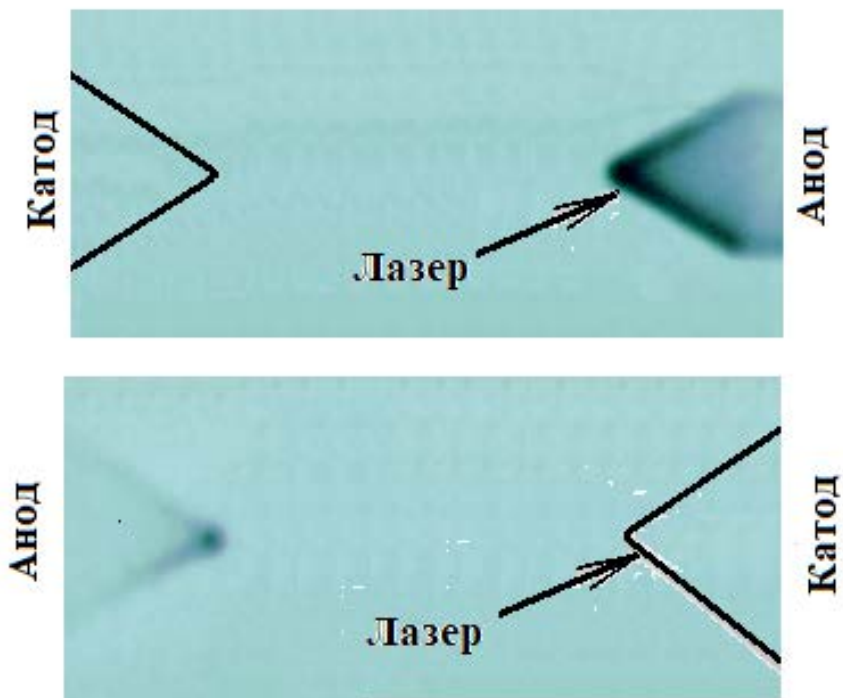
1- электроды; 2- сборка ТЛД

ТЛД на основе LiF  
Катодное инициирование

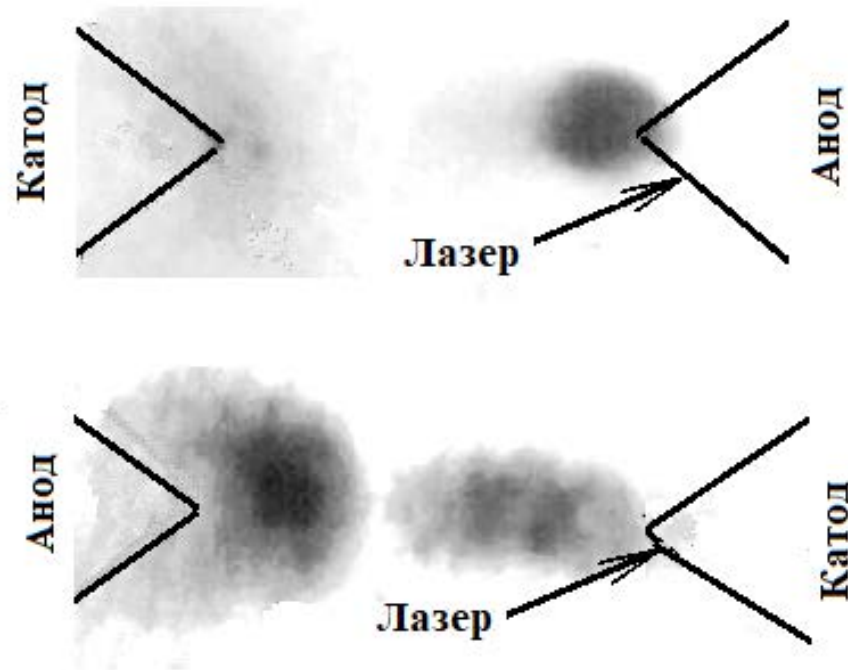


$$I \sim \exp\left(-\frac{hv}{kT_e}\right) \Rightarrow kT_e(hv) = -\frac{d(hv)}{d(\ln I)}$$

# Аллигатор: визуализация – рентгеновская обскура

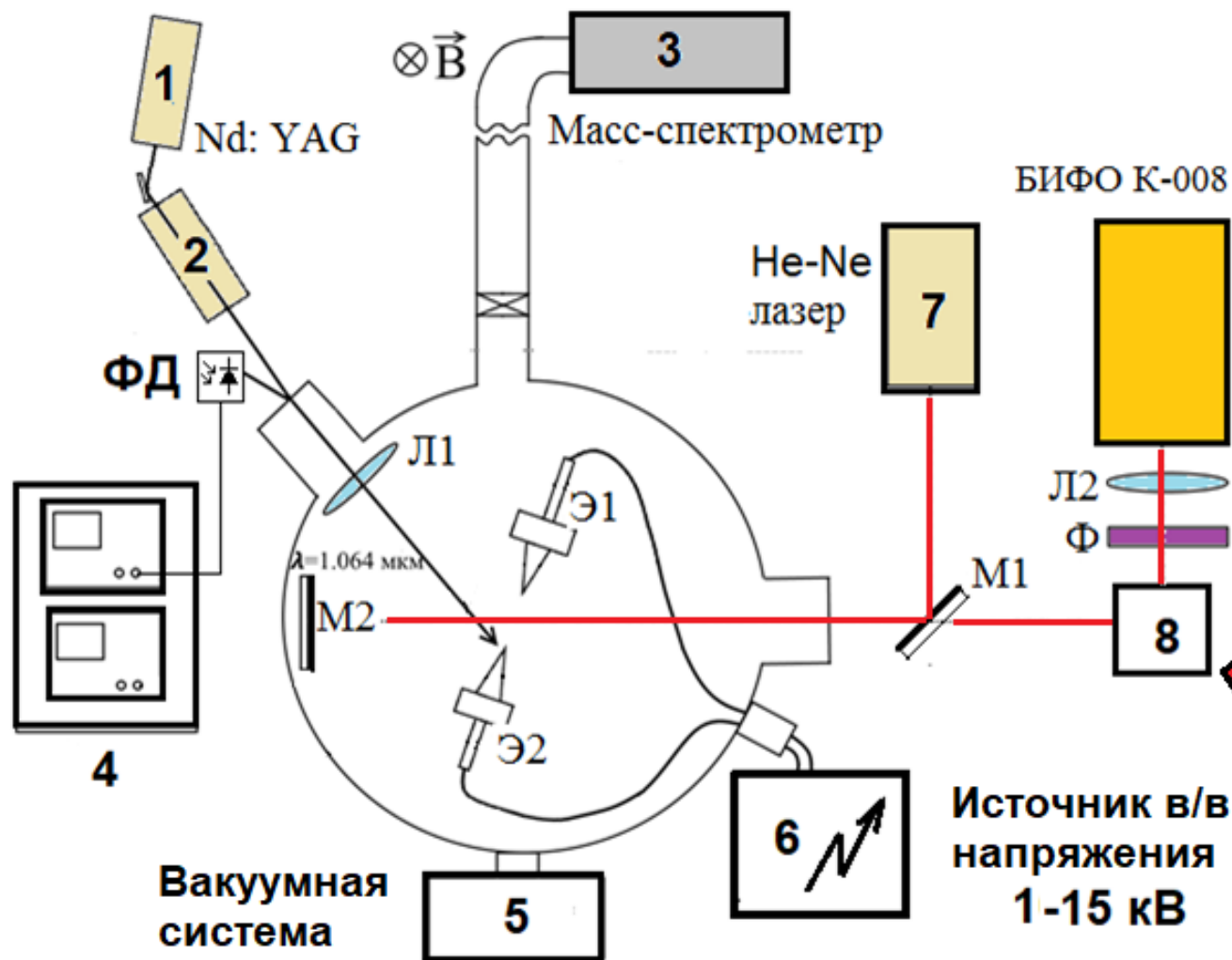


а)  $h\nu > 10$  кэВ

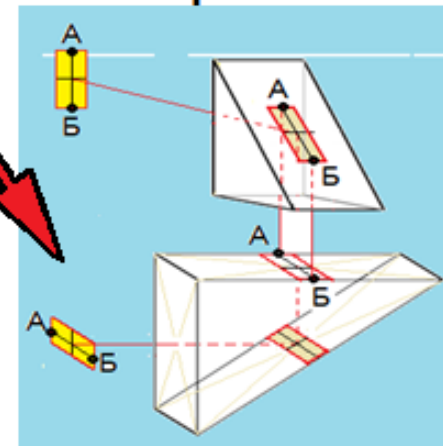


б)  $h\nu > 1$  кэВ

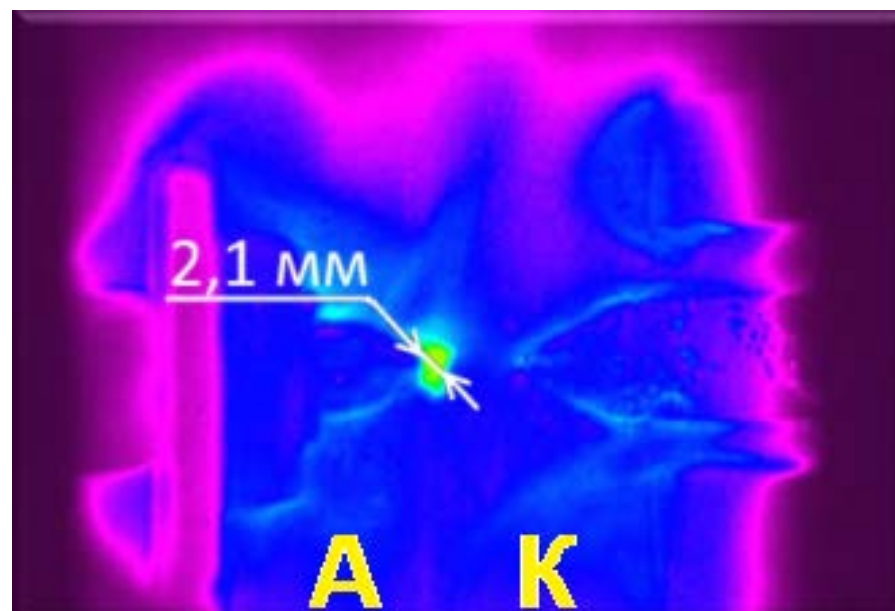
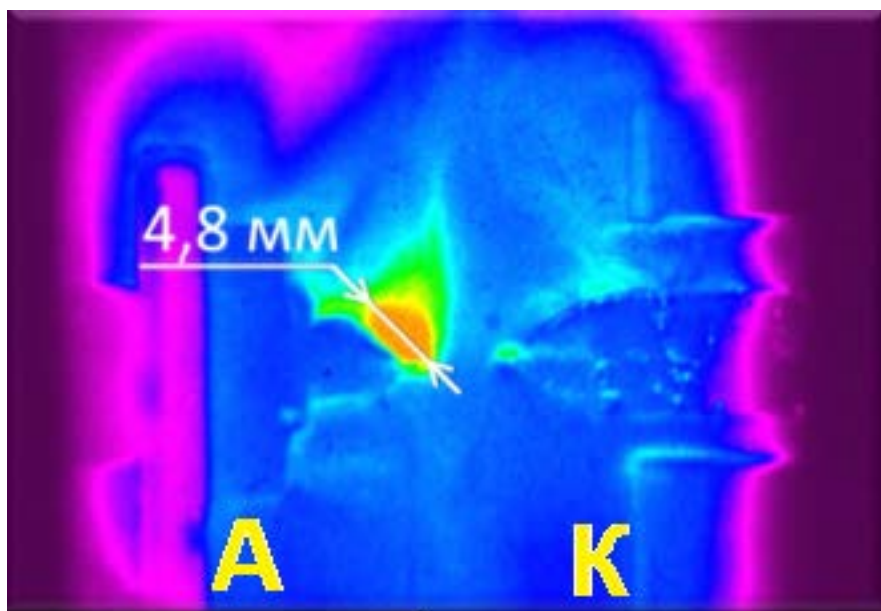
# Аллигатор: визуализация – цифровая камера БИФО К008



Система поворота изображения



## Анодное иницирование



Экспозиция 2 мкс

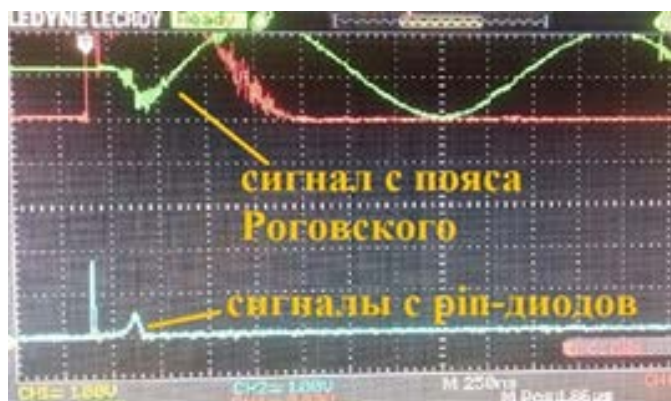
# Аллигатор: визуализация – цифровая камера БИФО К008 (режим «FRAME»)



## Катодное инициирование (ФС6)

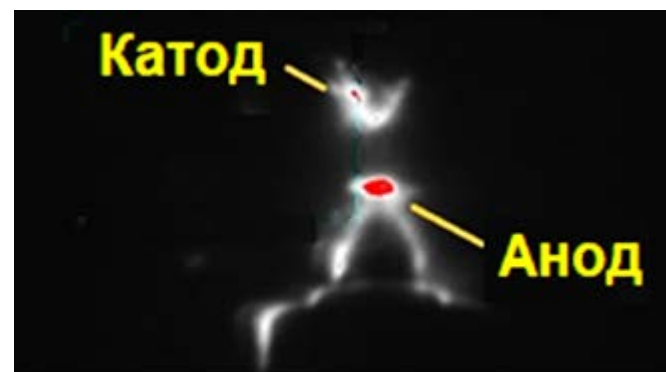


Экспозиция 300 нс



Развертка 250 нс/дел

## Анодное инициирование (без фильтра)

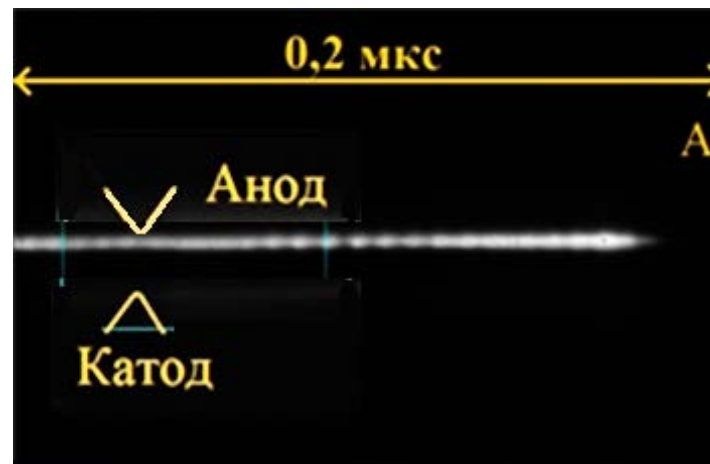
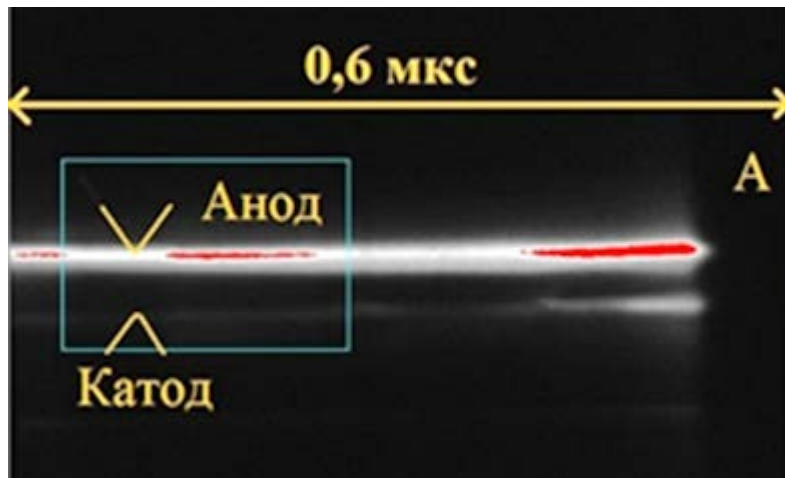


Экспозиция 300 нс

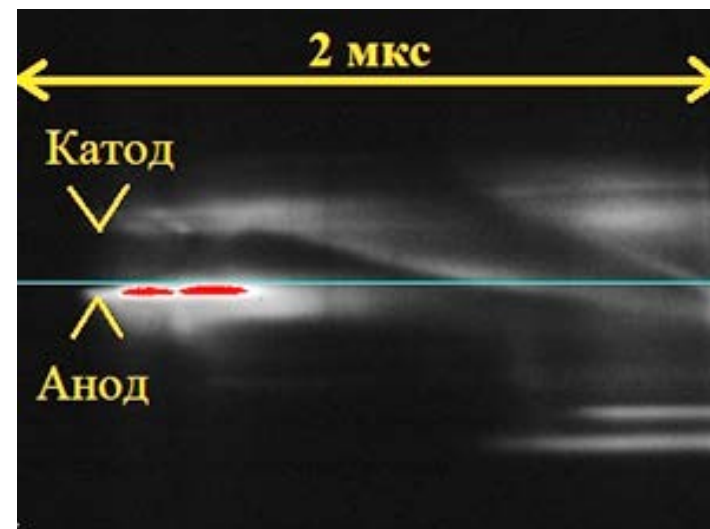
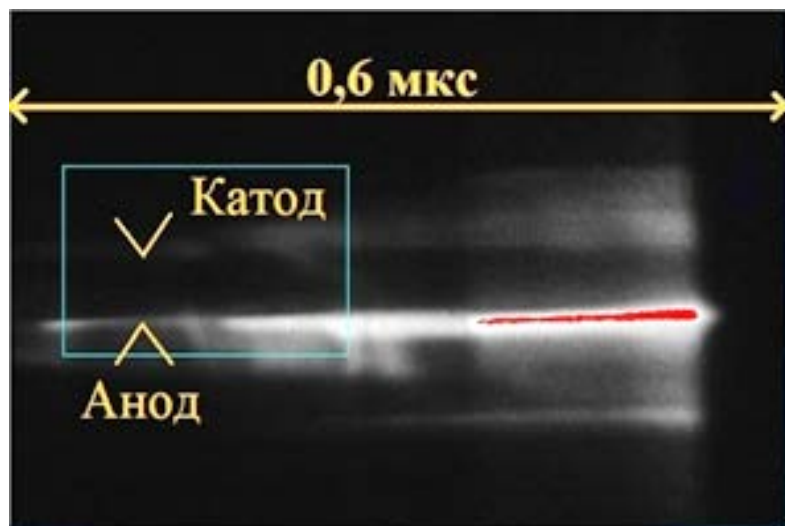


Развертка 250 нс/дел

# Аллигатор: визуализация – цифровая камера БИФО К008 (режим «STREAK»)



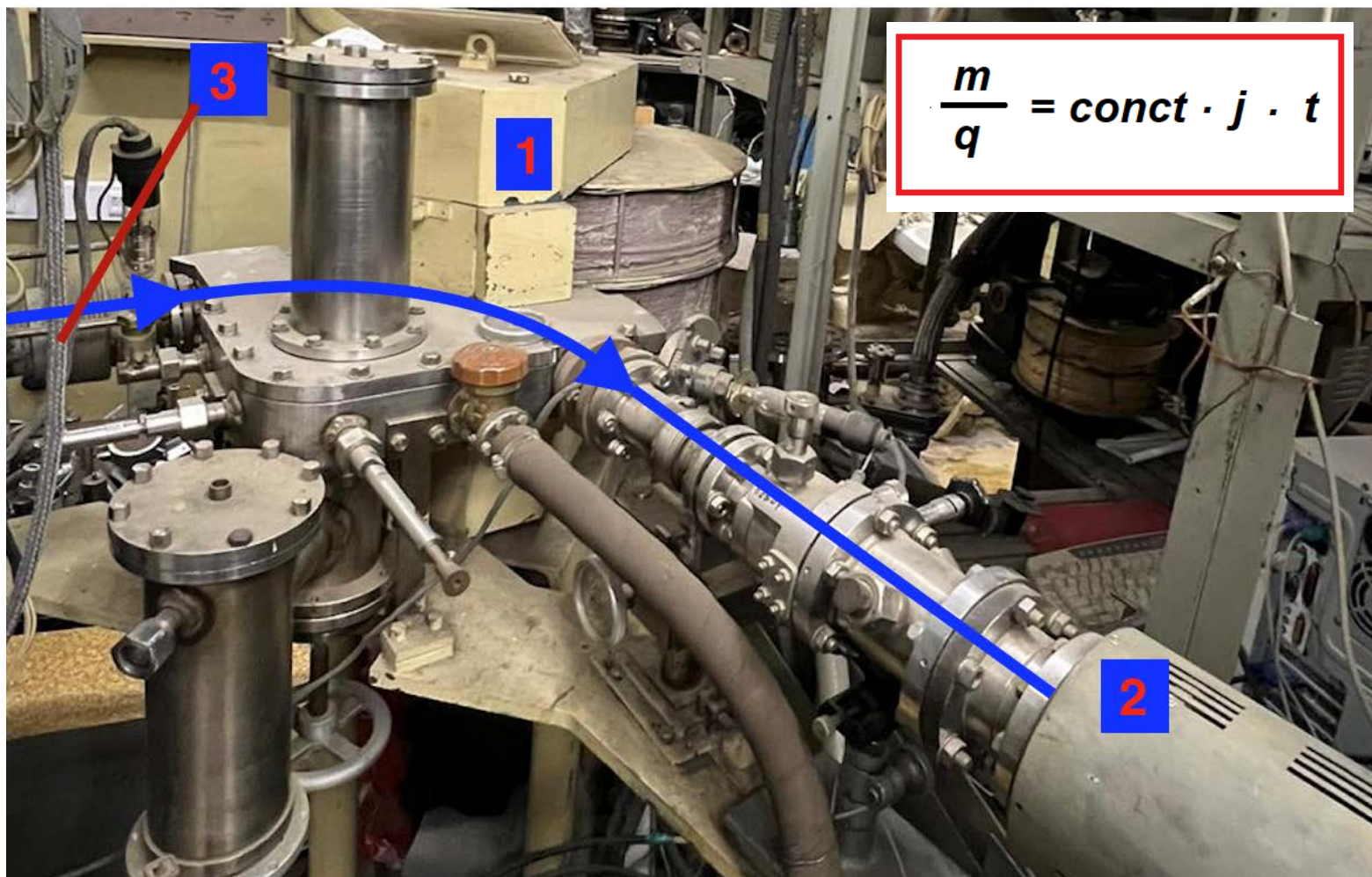
**Катодное  
иниции-  
рование**



**Анодное  
иниции-  
рование**



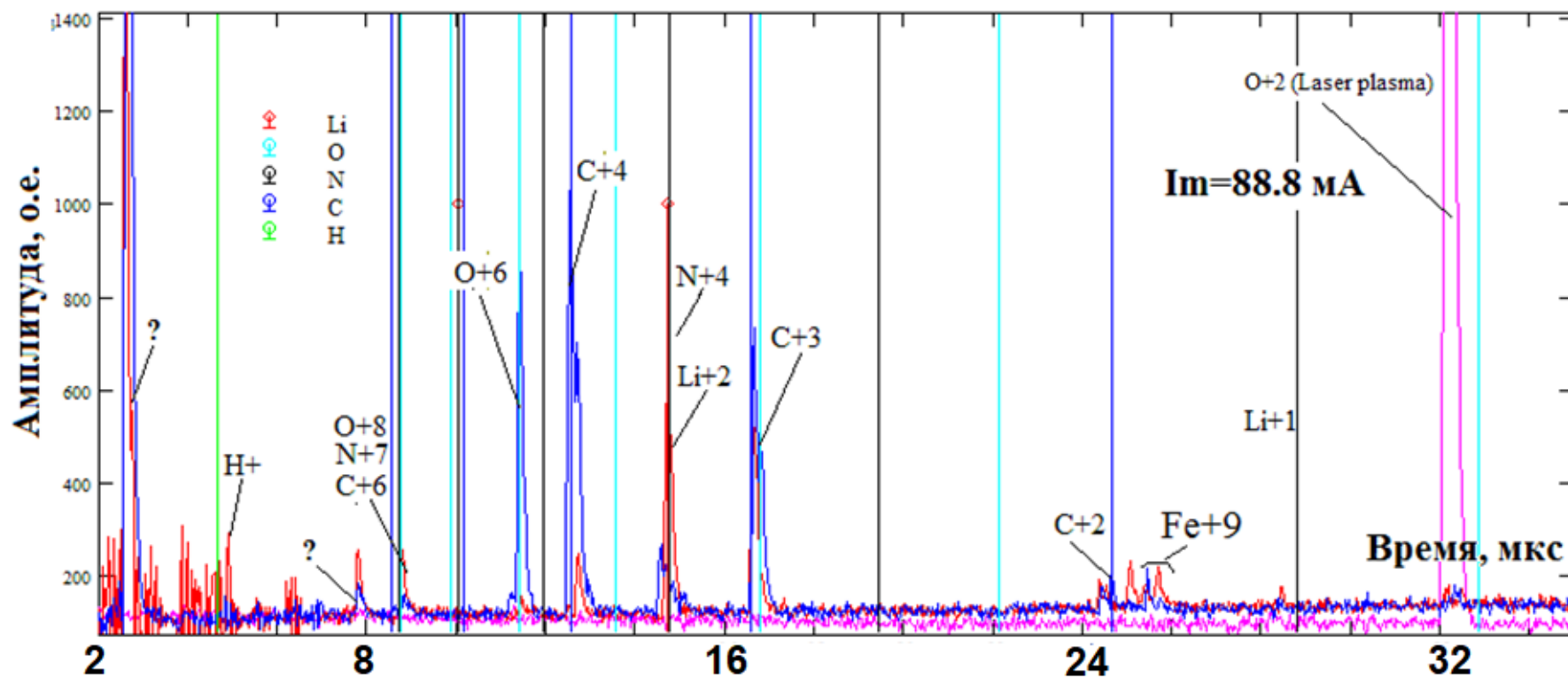
# Аллигатор: анализ ионов с помощью времяпролетного масс-спектрометра



# Аллигатор: анализ ионов с помощью времяпролетного масс-спектрометра



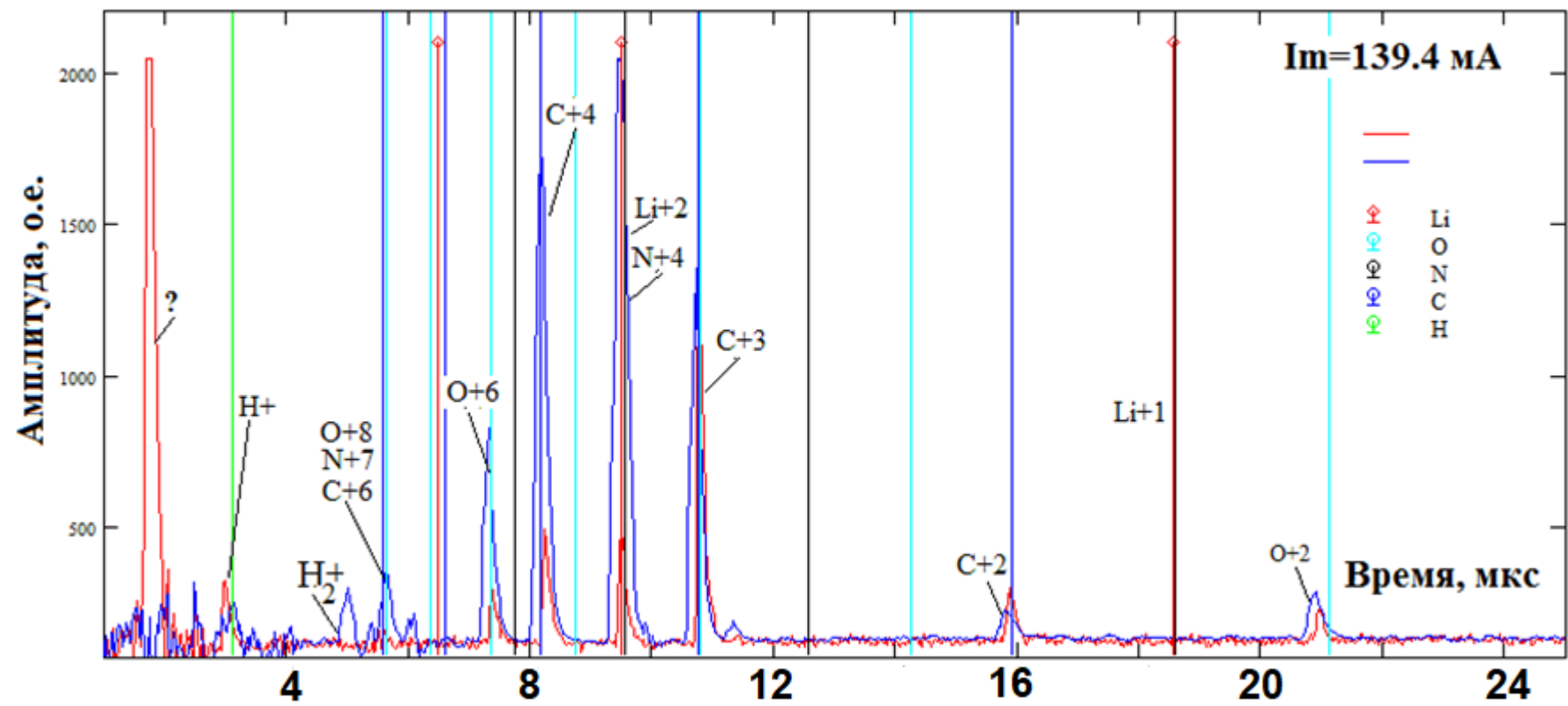
## Масс-спектр разрядной плазмы (Li- катод, Fe- анод) *Катодное инициирование*



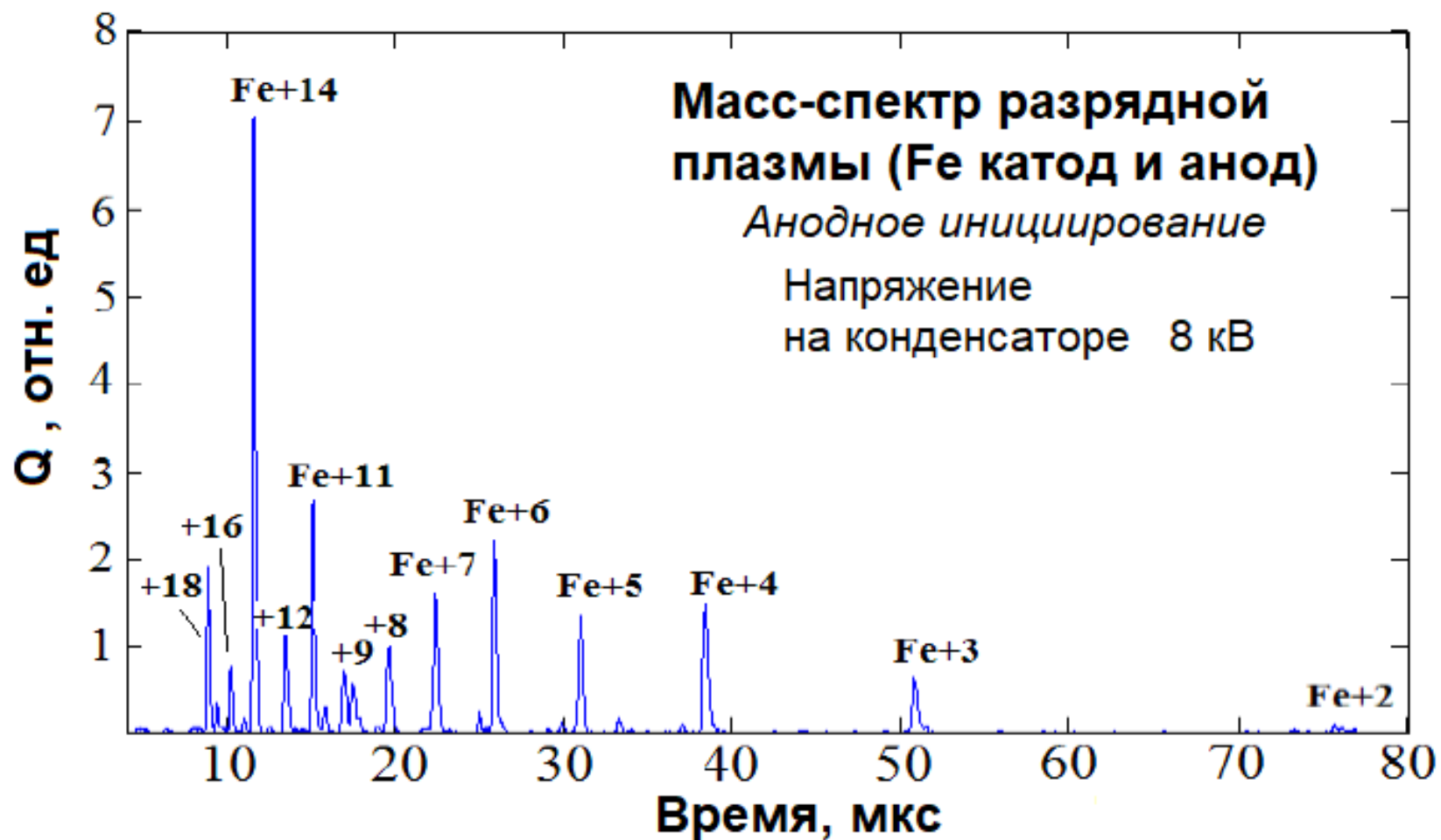
# Аллигатор: анализ ионов с помощью времяпролетного масс-спектрометра



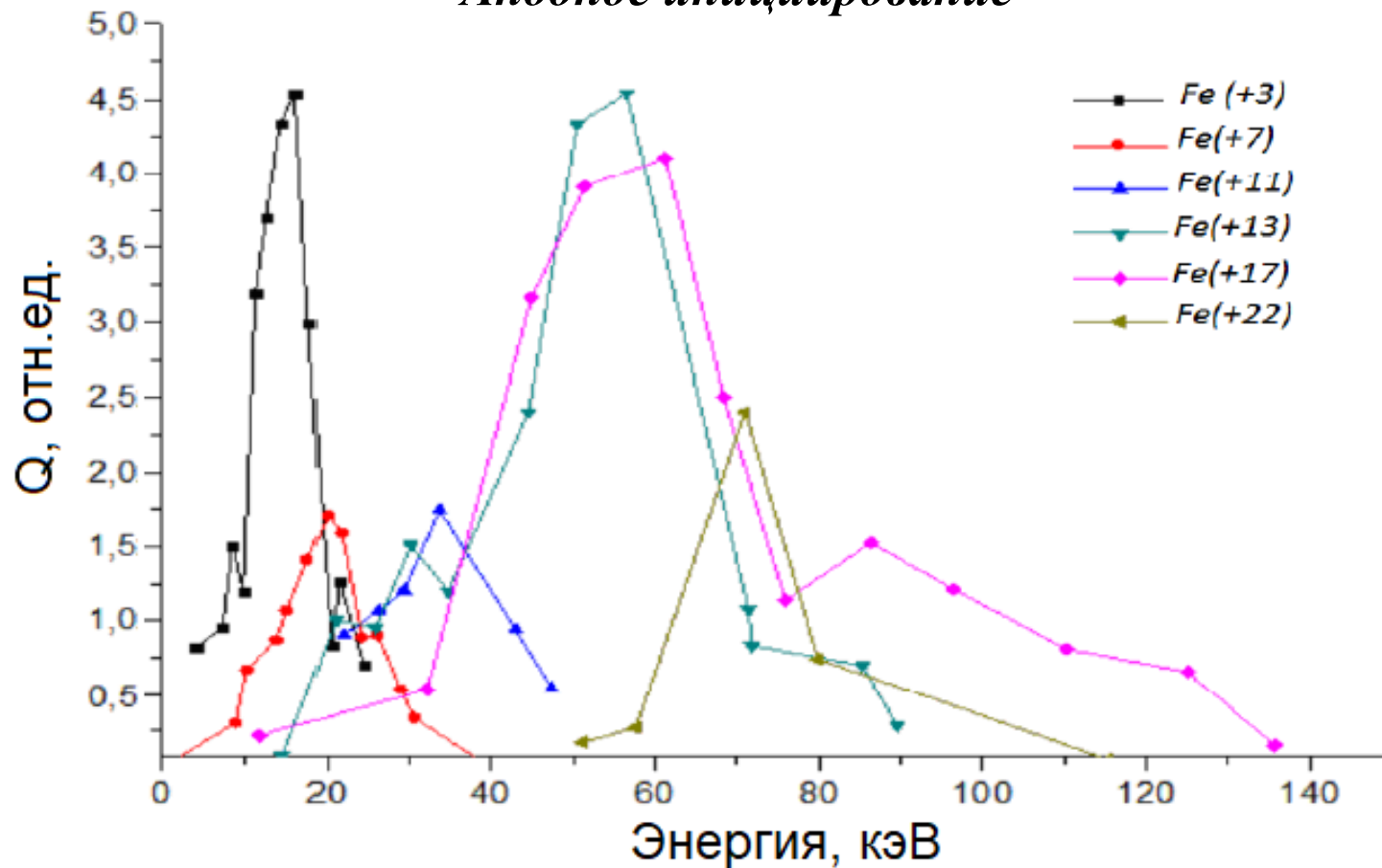
## Масс-спектр разрядной плазмы (Li- катод, Fe- анод) *Катодное инициирование*



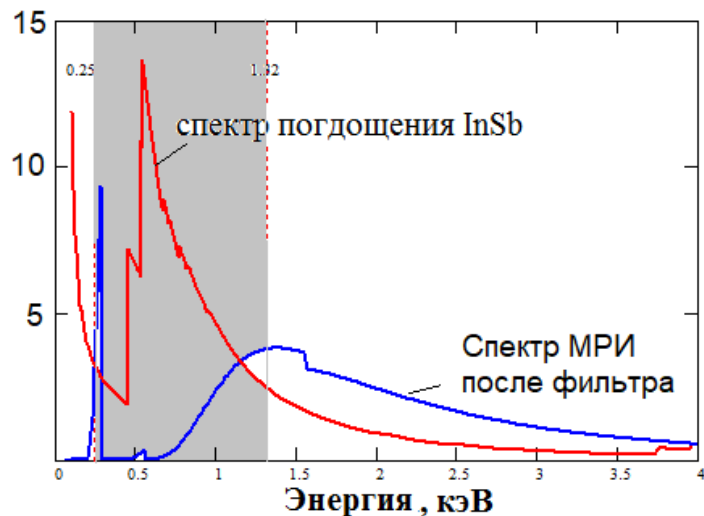
# Аллигатор: применения – генерация многозарядных ионов



## Энергетические распределения ионов *Анодное инициирование*

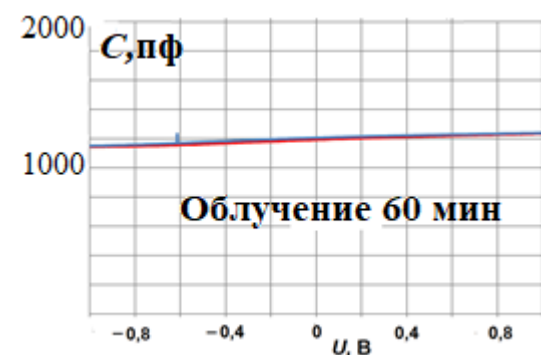
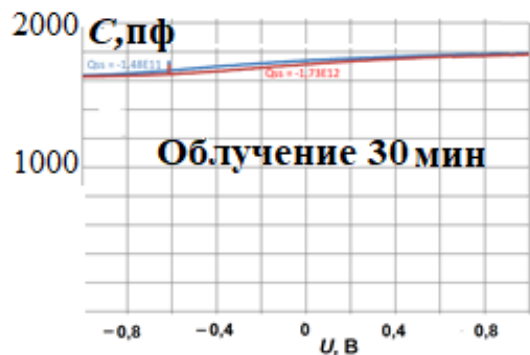
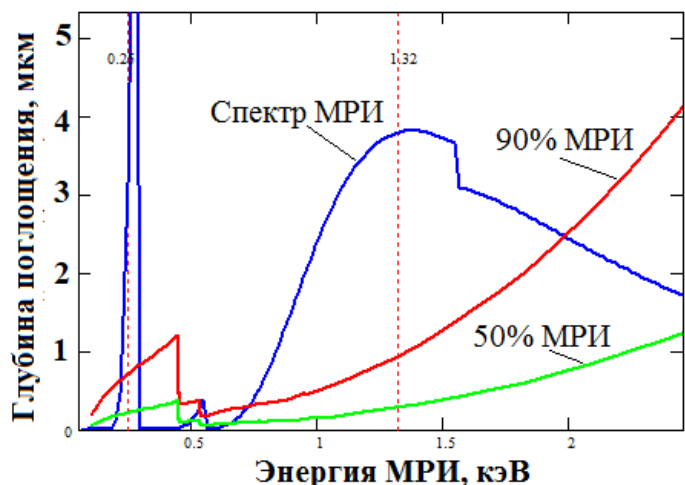
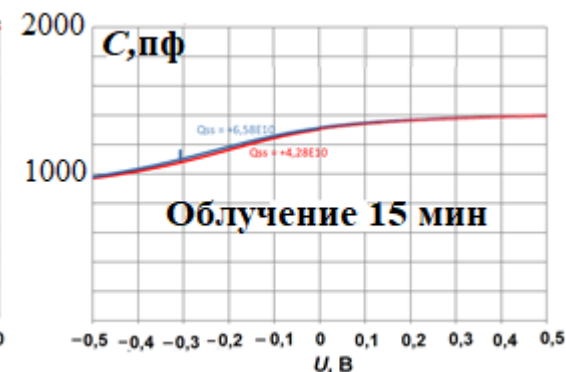
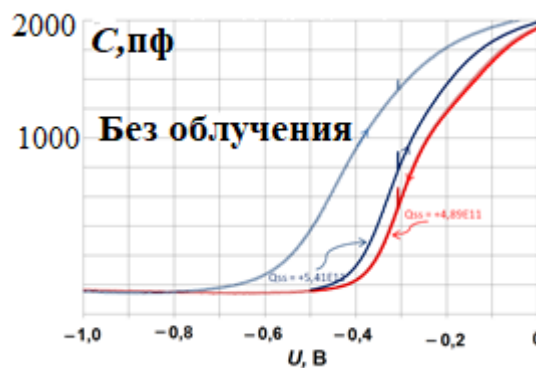


# Аллигатор: применения – источник МРИ для облучения образцов InSb

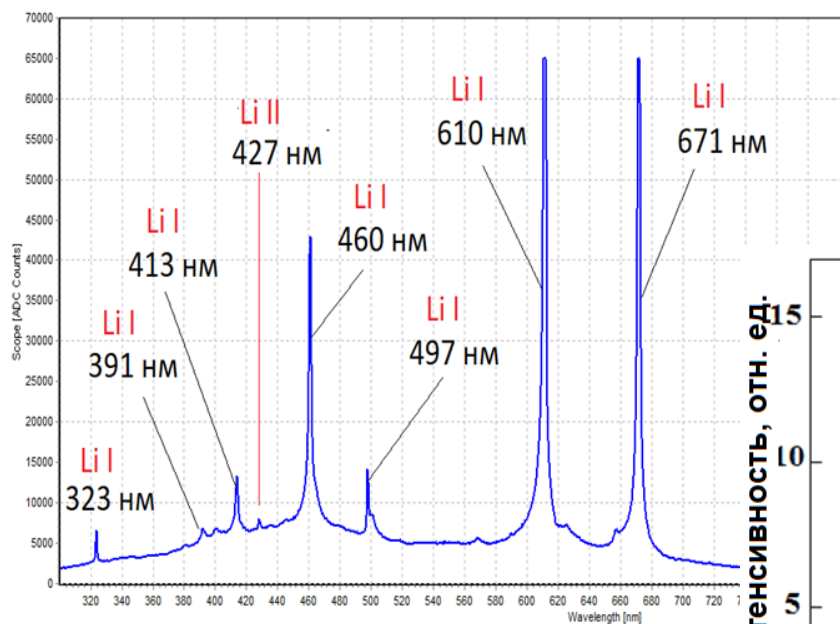


До 50% излучения с энергиями 0,5 ÷ 1,0 кэВ поглощается в слое толщиной 50÷100 нм

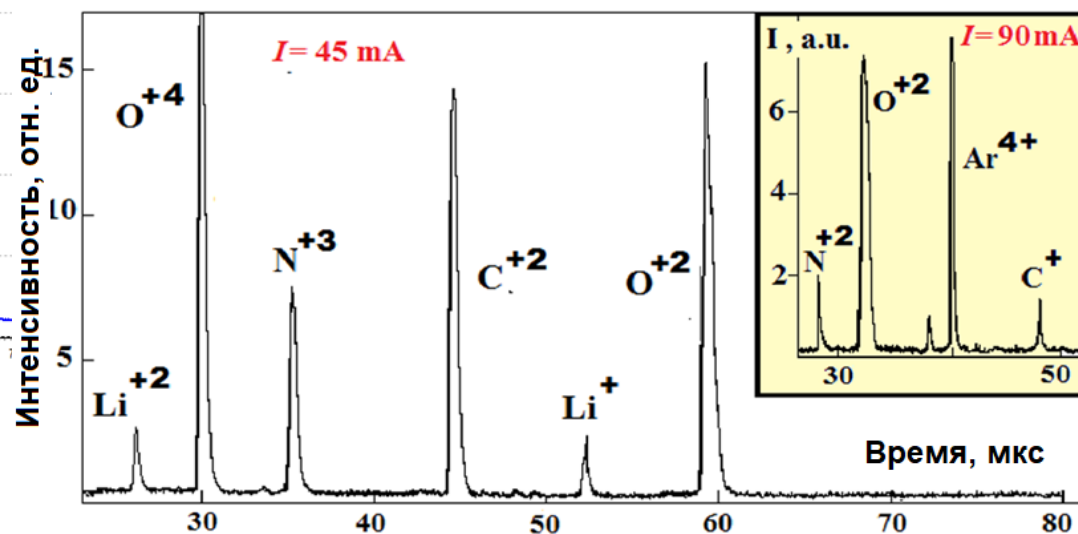
## ВФХ МДП-структуры



## LIBS-спектры пленки Li на Mo



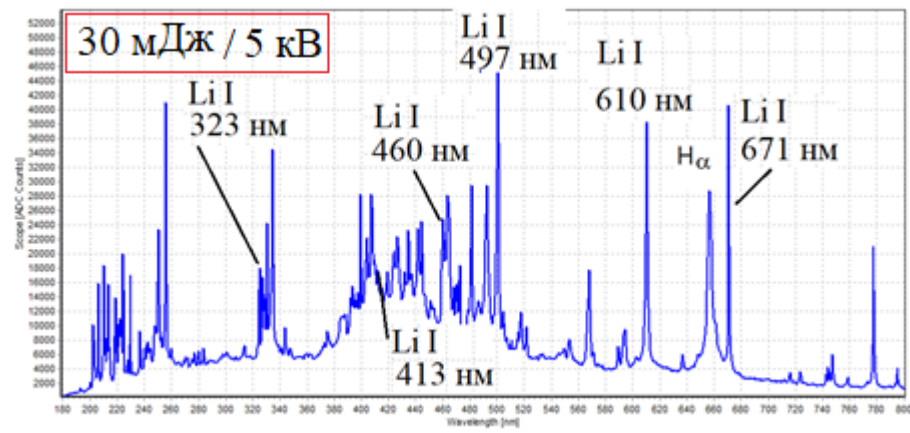
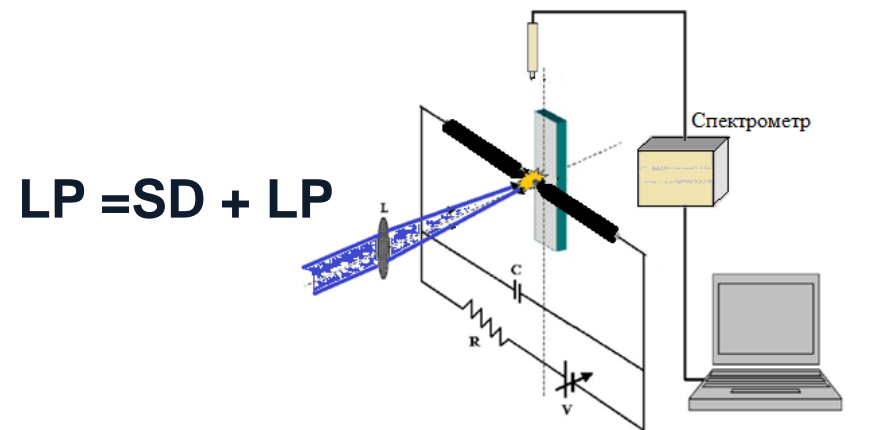
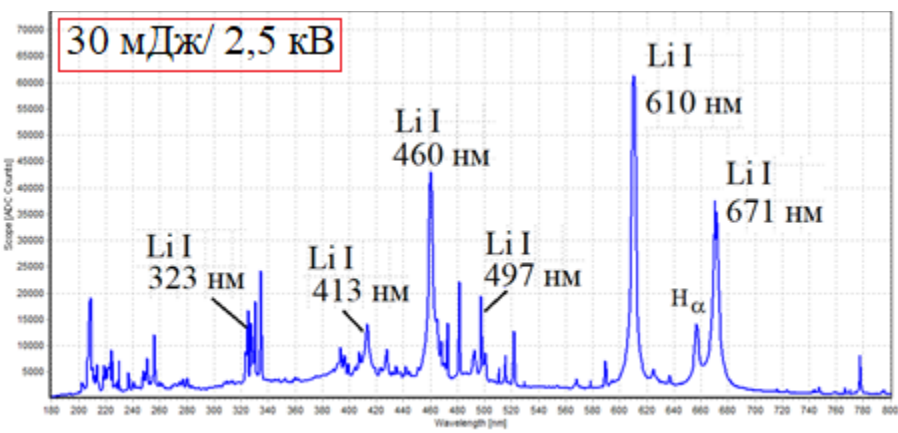
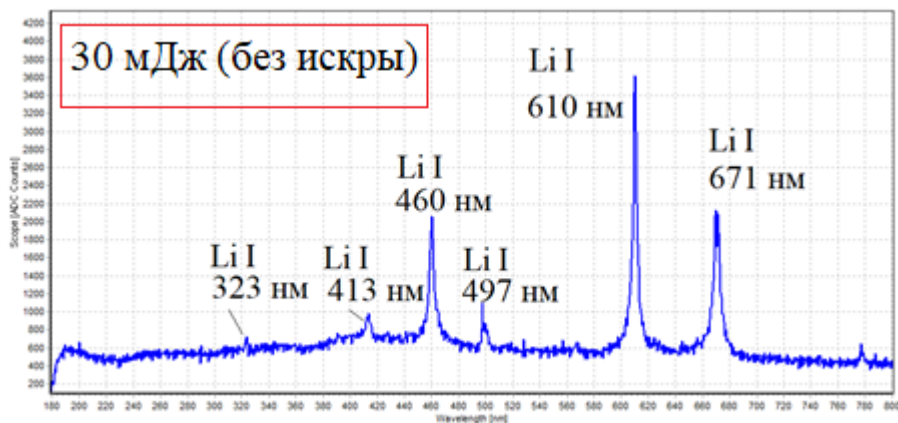
## Масс-спектры пленки Li на Mo



# Аллигатор: применения – искровой разряд + LIBS



Применение искрового разряда (SD) в сочетании с лазерной плазмой (LP) приводит к увеличению интенсивности линейчатого спектра и улучшению соотношения сигнал-шум.





# ЗАКЛЮЧЕНИЕ



- 1. Выполнена диагностика «быстрого» лазерно-индуцируемого вакуумного разряда с током до 10 кА, выгодно отличающегося от мощных сильноточных НВИ эмиссией ионов более высокой зарядности ( $\text{Fe}^{+22}$ ), и определены его основные характеристики: температура 0,6 кэВ и концентрация до  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ .**
- 2. Рассмотрено применение вакуумного лазерно-индуцируемого искрового разряда для облучения рентгеновским излучением ( $h\nu = 1\text{--}10 \text{ кэВ}$ ) полупроводника InSb с целью модификации его приповерхностного слоя.**
- 3. Показана перспектива применения лазерно-индуцируемого искрового разряда в схемах лазерной масс-спектрометрии и лазерной искровой эмиссионной спектроскопии для элементного анализа материалов.**

**БЛАГОДАРЮ ЗА  
ВНИМАНИЕ!**