



ВНИИА
РОСАТОМ

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ХРОНОГРАФИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ РЕГИСТРАТОРОВ

Коновалов П.И., А.Ю. Соколов, Р.И. Нуртдинов, А.С. Долотов, Д.В. Никишин, Д.И. Сметанкин,
М.П. Викулин, А.В. Щербаков, В.В. Муханов, И.А. Ефимов

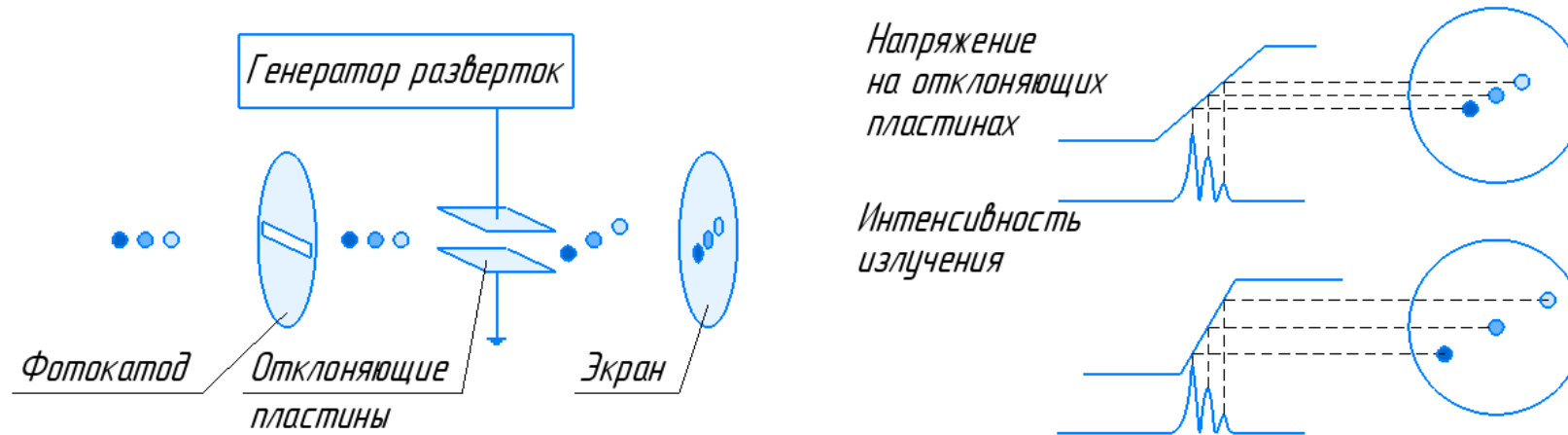
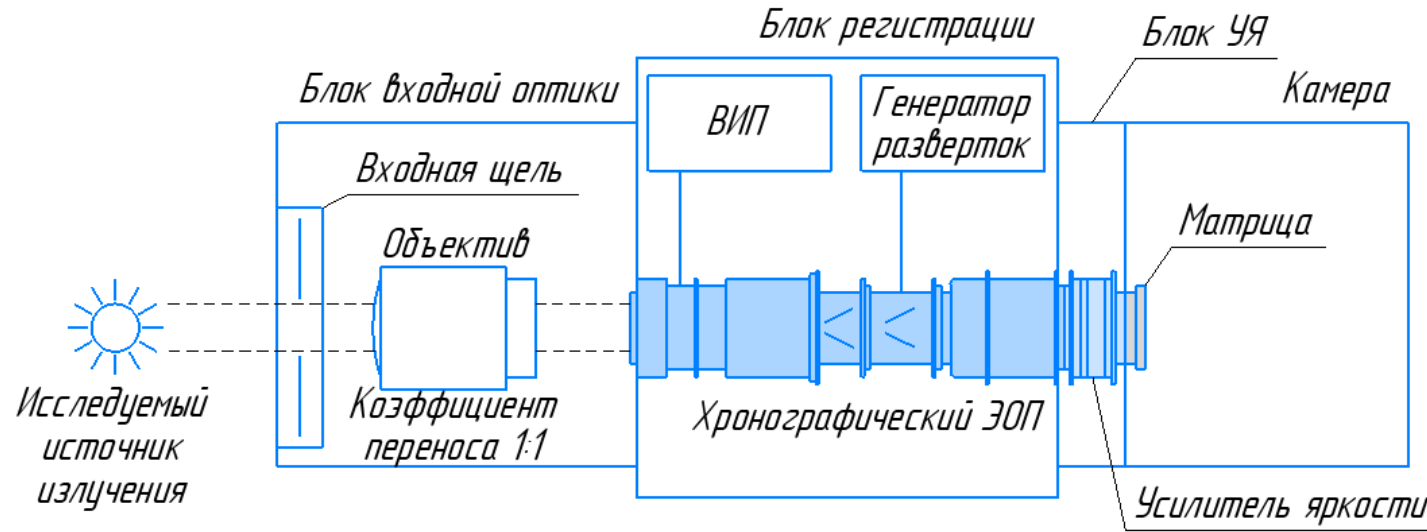
ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ, 2023 г.

Коновалов Павел Игоревич

Начальник научно-производственного отдела 581 ФГУП «ВНИИА»

22-26 мая 2023 г.

Устройство и принцип действия хронографических электронно-оптических регистраторов



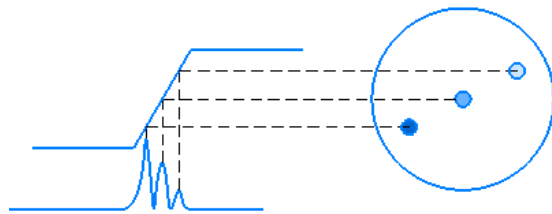
Основные характеристики электронно-оптического регистратора



Пространственное разрешение и информационная емкость

$$N_z = \frac{N_{\phi k}}{\Gamma_0}$$

$$m = N_z \times L = \frac{N_{\phi k} \times L}{\Gamma_0}$$



Динамический диапазон

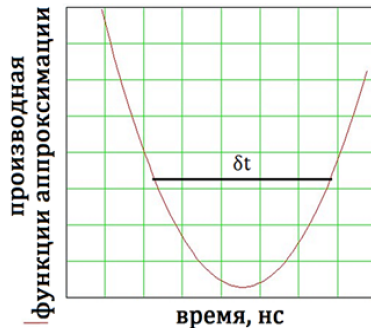
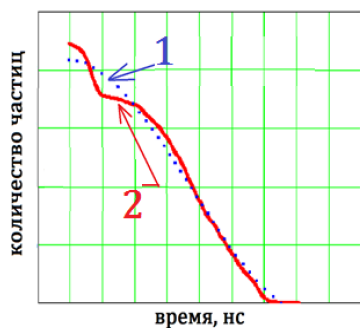
$$\text{ДД} = \frac{I_{max}}{I_{min}}$$

I_{max} - мощность излучения, при которой наблюдается расширение импульса, поданного на вход ЭОР, на 20% от эталонной ширины

I_{min} - мощность излучения, при которой амплитуда отклика превышает 3..5 СКО яркости на выходе

Временное разрешение

$$N_t = \sqrt{\Delta t_{\phi}^2 + \Delta t_{\tau}^2} \quad \Delta t_{\phi} \leftarrow f(t) = \frac{dN(t)}{dt}$$



$$\Delta t_{\tau} = \frac{1}{N_z \cdot V}$$

$$\Delta t_{\tau} = \frac{\tau_{\phi}}{N_z \cdot L} = \frac{\tau_{\phi}}{m}$$

Входной импульс :

$$f_2(x, a_0, w_0) := a_0 \cdot \frac{2\sqrt{\ln(2)}}{w_0 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left[\frac{-4 \ln(2) (x - b)^2}{w_0^2}\right]$$

ПШПВ ЭОР:

$$w(a_0, t_{\phi}, t_m) = \sqrt{w_0^2 + t_{\phi}^2 + t_m^2}$$

Энергия выходного импульса: $a(a_0) = a_0 \cdot k_{np}$

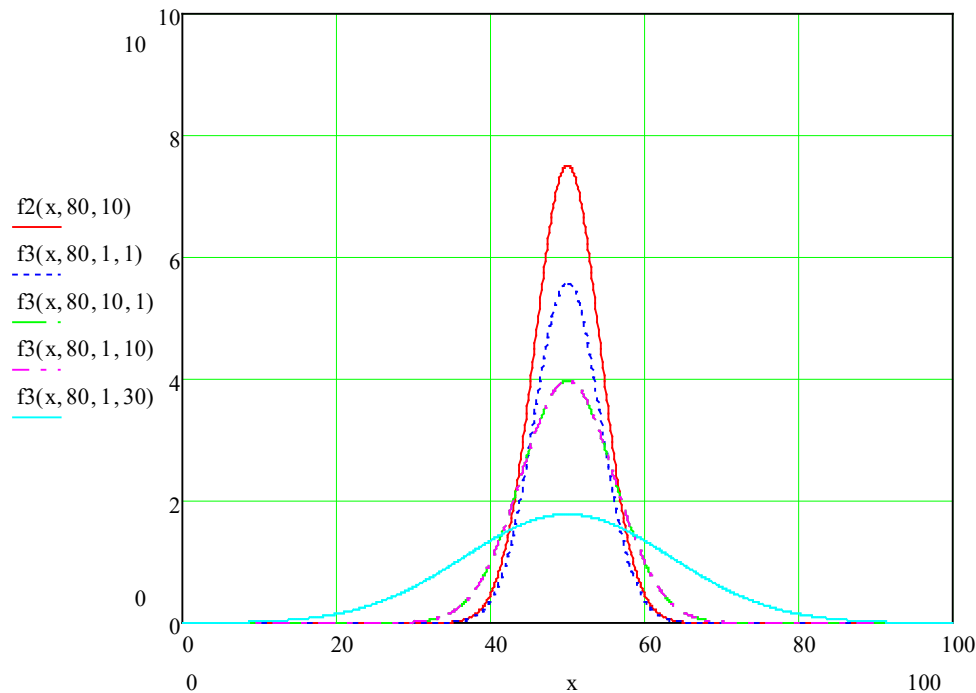
Функция отклика :

$$f_3(x, a_0, t_{\phi}, t_m) = a_0 \cdot k_{np} \cdot \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{w_0^2 + t_{\phi}^2 + t_m^2} \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left[\frac{-4 \ln 2 \cdot (x - b)^2}{w_0^2 + t_{\phi}^2 + t_m^2}\right]$$

Ограничения верхнего порога



Временное разрешение – причина ограничения



$$f_3(x, a_0, t_\phi, t_m) = a_0 \cdot k_{np} \cdot \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{w_0^2 + t_\phi^2 + t_m^2} \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left[\frac{-4 \ln 2 \cdot (x - b)^2}{w_0^2 + t_\phi^2 + t_m^2}\right]$$

Физическое временное разрешение – состав

$$\Delta t_\phi = \sqrt{\Delta t_{\phi 1}^2 + \Delta t_{\phi 2}^2 + \Delta t_{\phi 3}^2 + \Delta t_{\phi 4}^2}$$

$\Delta t_{\phi 1}$ - инерционность фотокатода

$$\Delta t_{\phi 2} = 2,34 * 10^{-8} \frac{\sqrt{\epsilon_0}}{E} \quad \text{- хроматическая aberrация}$$

- Снижение разброса начальных энергий
- Увеличение напряженности электрического поля в прикатодной области

$\Delta t_{\phi 3}$ - дисперсии времен пролета до отклоняющей системы и после отклоняющей системы

Объемный заряд

Техническое временное разрешение – состав

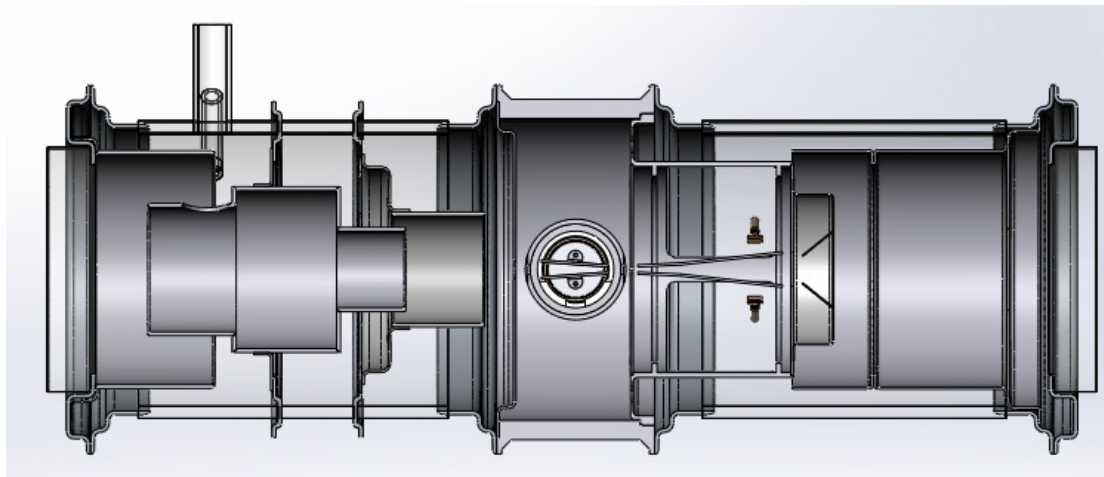
$$\Delta t_\tau = \frac{\tau_p}{N_3 * L} = \frac{\tau_p}{m}$$

Объемный заряд
Нарушение эквипотенциальности фотокатода

Ограничения верхнего порога: объемный заряд



ВНИИА
РОСАТОМ



Ухудшение физического временного разрешения из-за роста дисперсии времени прихода электронов

Ухудшение технического временного разрешения из-за снижения пространственного разрешения



Повышение напряженности электрического поля:
- металлокерамический корпус
- сборка методом переноса

Ликвидация кроссовера – изменение конструкции



Ограничения верхнего порога – напряженность электрического поля

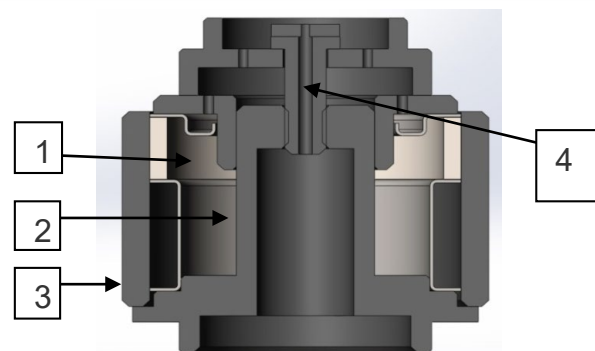
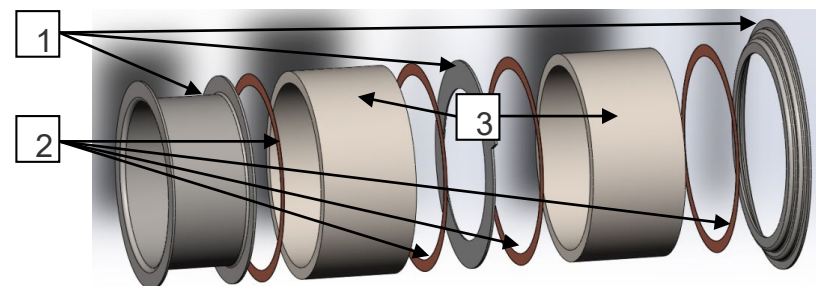
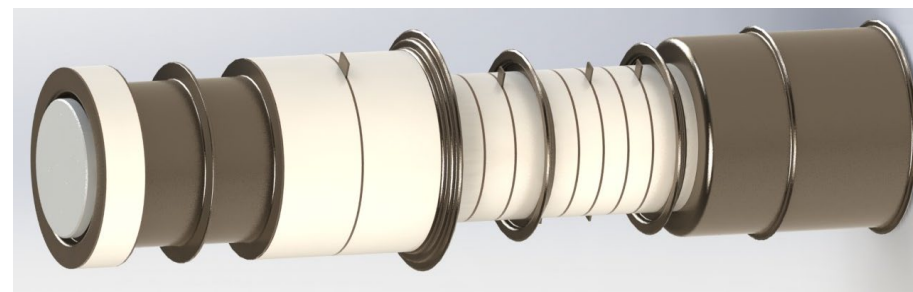


ВНИИА
РОСАТОМ

Металлостеклянный корпус

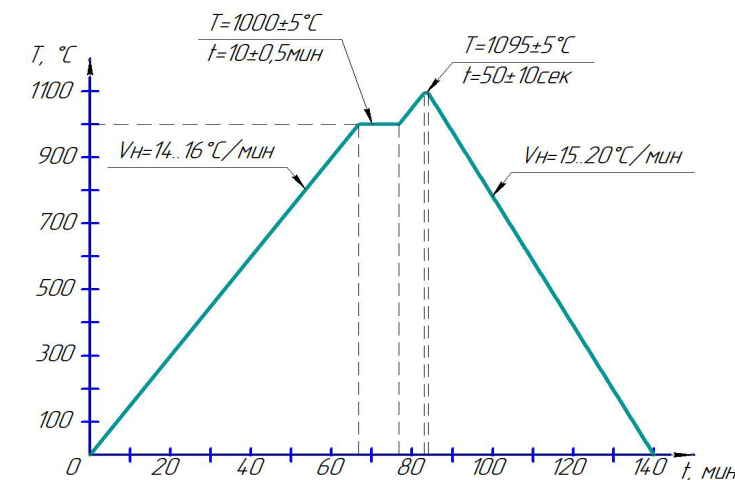


Металлокерамический корпус



Преимущества

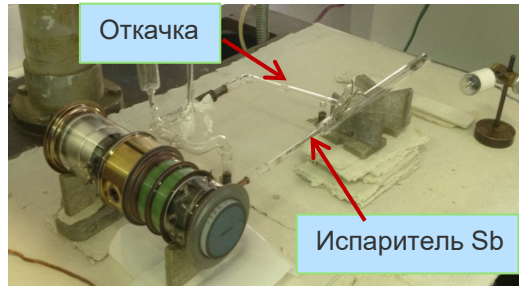
1. Механическая прочность
2. Электрическая прочность
3. Технологичность
4. Безопасность
5. Габариты



Метод переноса – способ снизить объемный заряд



1. Штенгельная откачка



2. Формирование фотокатода



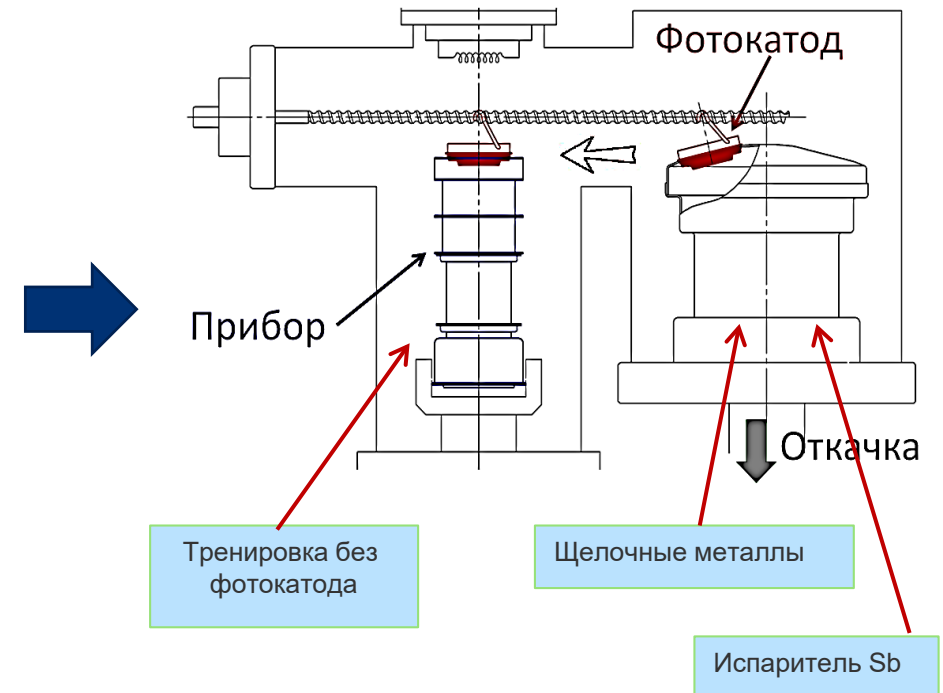
3. Тренировка



Недостатки штенгельной технологии:

1. Высокий темновой ток из-за адсорбции щелочных металлов
2. Низкая электрическая прочность
3. Низкая напряженность электрического поля
4. Низкая чувствительность фотокатода
5. Падение чувствительности в процессе тренировки
6. Динамический диапазон не более 3000 (на 350 пс)
7. Низкий процент выхода годных

Технология финишной сборки методом переноса

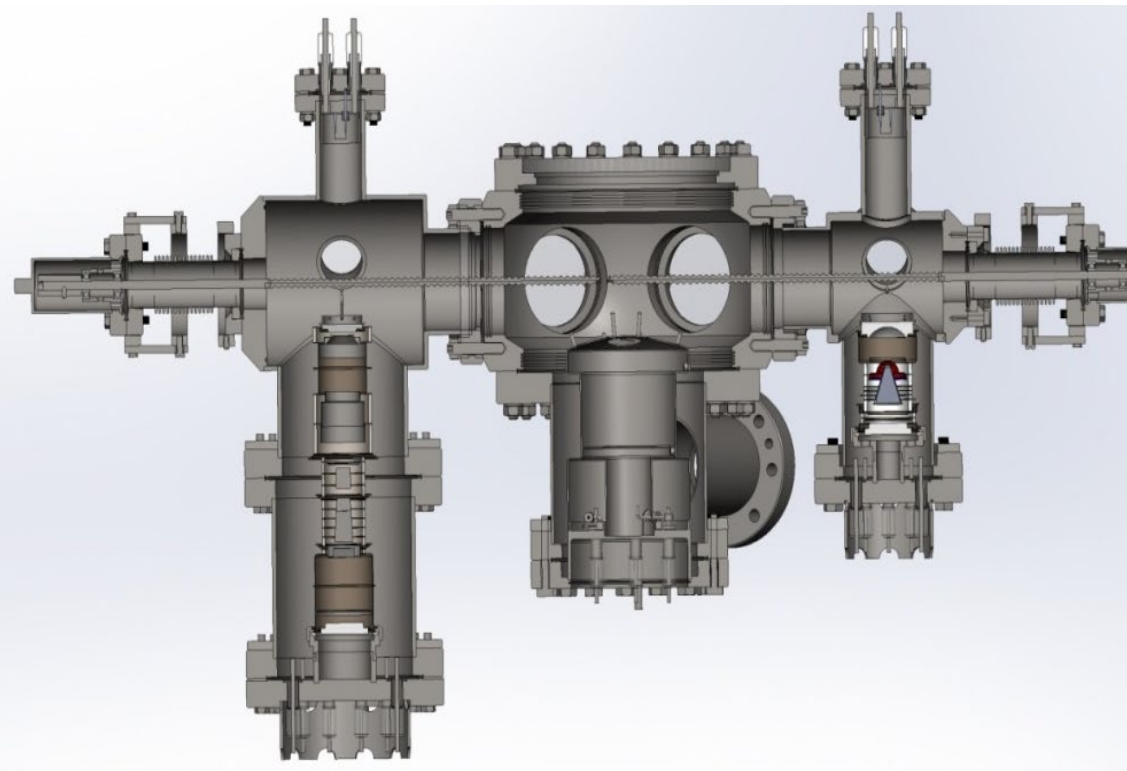
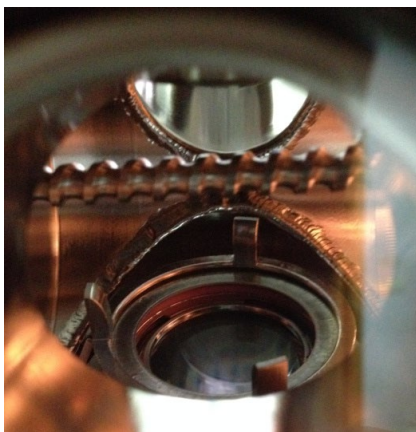


Метод переноса – способ снизить объемный заряд



ВНИИА
РОСАТОМ

Установка финишной сборки методом переноса

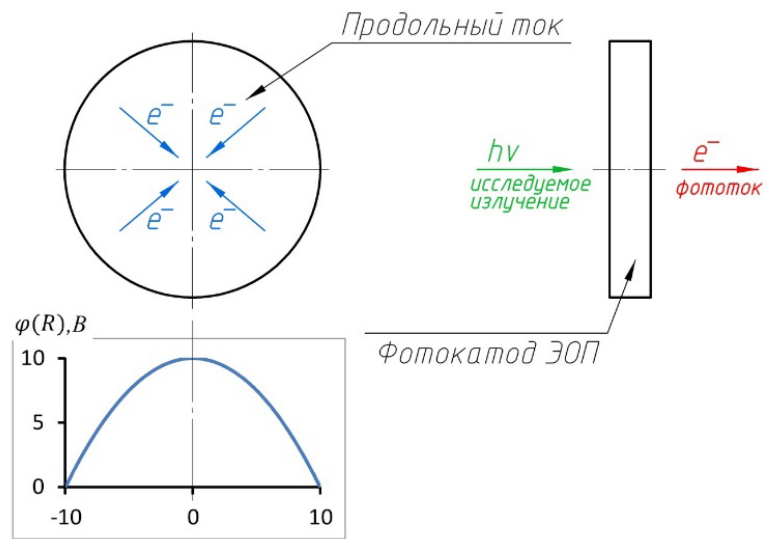


Нарушение эквипотенциальности фотокатода – потеря пространственного разрешения

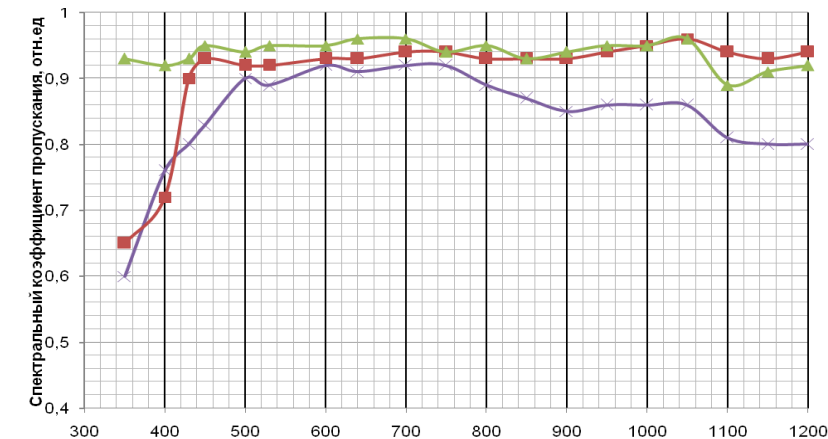
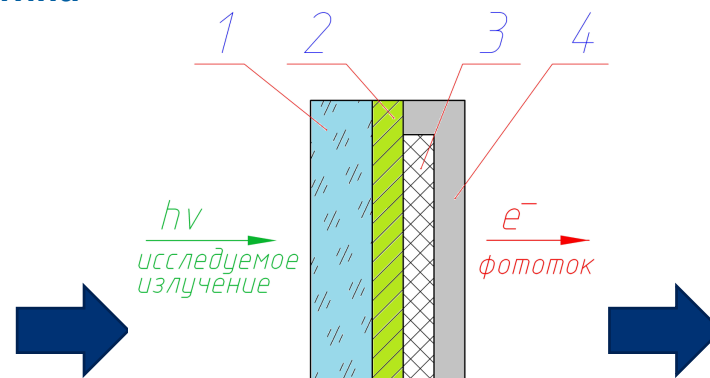


ВНИИА
РОСАТОМ

Проводящая подложка конденсаторного типа



Распределение потенциала по поверхности катода



Высокое оптическое пропускание
Низкое сопротивление
(200 Ом/□)
Совместимость с классическими фотокатодами

Хронографический ЭОП ТПО30-01



ВНИИА
РОСАТОМ



Наименование характеристик	«ВНИИА» Россия	«PHOTEK» Англия		«Photonis» Франция	
	ТПО30-01	ST-Y	C13410-01A	P820PM	P520PM
Тип фотокатода	S20	S20	S20	S20	S20
Световая чувствительность фотокатода, мкА/лм	350-400	информация отсутствует	информация отсутствует	информация отсутствует	информация отсутствует
Спектральная чувствительность фотокатода на длине волны 800 нм, мА/Вт	30	20	10	30	30
Спектральная чувствительность в максимуме характеристики, мА/Вт	60	50	60	50	50
Пространственное разрешение по фотокатоду, штр/мм:	40 (по полю экрана)	25 (в центре катода)	18 (в центре катода)	25 (в центре катода)	20 (в центре катода)
Динамический диапазон регистрации при длительности процесса 350 пс и более, отн.ед,	1·10 ⁴	информация отсутствует	0,7·10 ⁴	информация отсутствует	2500
Расчетное предельное временное разрешение, пс	0,7	30	5	2	5
Рабочее поле фотокатода по высоте, мм	10	35	17	диаметр 10	диаметр 10

Хронографический электронно-оптический регистратор ТХОР1



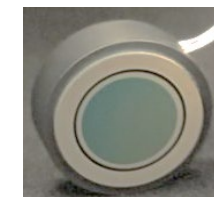
ВНИИА
РОСАТОМ



На базе электронно-оптических преобразователей

ТПО30-01

ТПО25



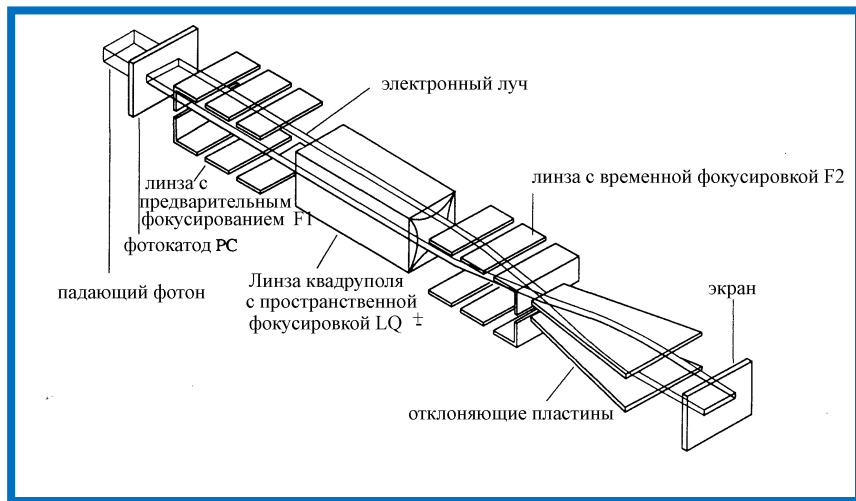
Модель, производитель	Область спектральной чувствительности, нм	Длительности временных разверток	Динамический диапазон регистрации, отн. ед.	Предельное временное разрешение, пс
ТХОР1, ВНИИА	380-900	0,5 нс - 100 мкс	4000	1,4
«Optronis SC-10», Германия	200-900	10 нс-1мс	200	2
«SYDOR ROSS 8200», США	300-1050	0,2 нс - 500 мкс	2500	1
К016, БИФО, Россия	270-1200	0,1-100 нс	300	2
«AXIS-PV», Axis Photonique, Канада	300-1400	0,2 нс - 1 мс	800	1
«PS-1/S1», ИОФ РАН, Россия	300-1060	1-100 нс	1000	1,3

Изменение электронной оптики – удаление зон концентрации объемного заряда

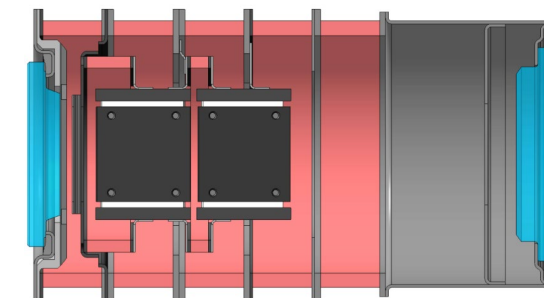
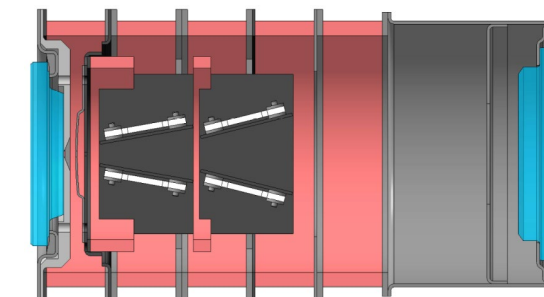
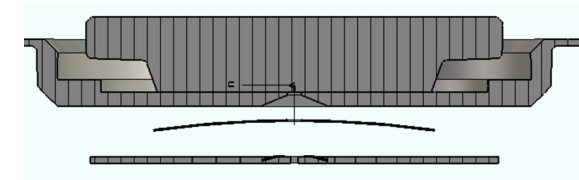
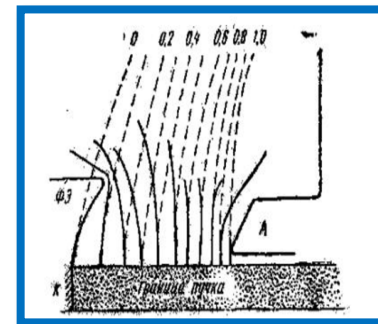


ВНИИА
РОСАТОМ

Оптика компании «PHOTONIS»



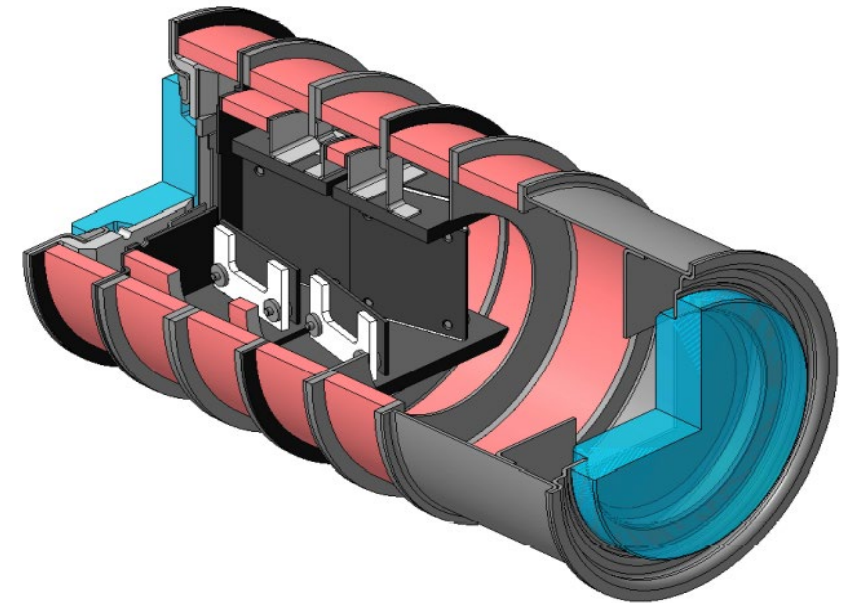
Оптика на базе пушки Пирса (ФГУП «ВНИИА»)



Изменение электронной оптики – удаление зон концентрации объемного заряда



Наименование параметров ЭОП	Значение параметров ЭОП			
	Разрабатываемый ЭОП		ТПО30-01	
Разрешение пространственное на координате экрана	Центр	граница	Центр	граница
	По направлению развертки, штр./мм	160/70	157/64	40/40
По высоте изображения, штр./мм	7/7	10/10	40/40	40/40
Оптическое увеличение	Не более 1		1,7	
Отношение удельной плотности пространственного заряда разрабатываемой системы к значению этого параметра для ТПО30-01	Не более 0.05		1	
Временное разрешение, фс	Не более 500		Не менее 1 000	
Амплитуда развертки изображения, мм	16		16	
Информационная емкость	2400		640	



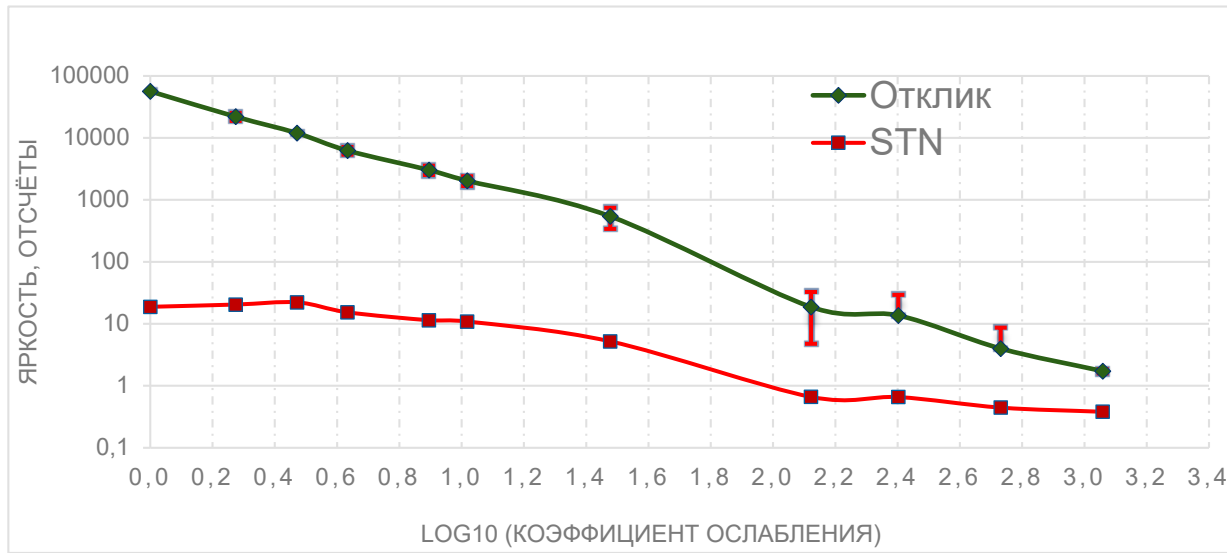
В изготовлении

Ограничения нижнего порога



ВНИИА
РОСАТОМ

Отношение сигнал-шум кадров и динамический диапазон



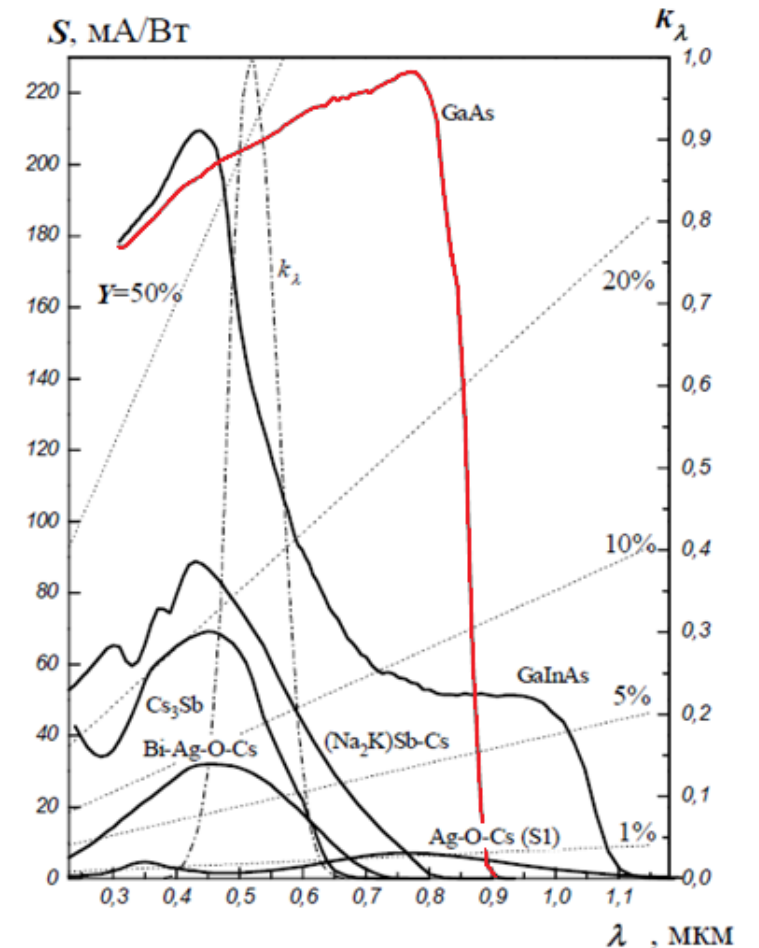
Высокая чувствительность фотокатода

Высокое отношение сигнал/шум приборов:

STN хронографических ЭОП определяется фотокатодом

STN ЭОП-усилителей ограничен шумом МКП

Спектральные чувствительности фотокатодов

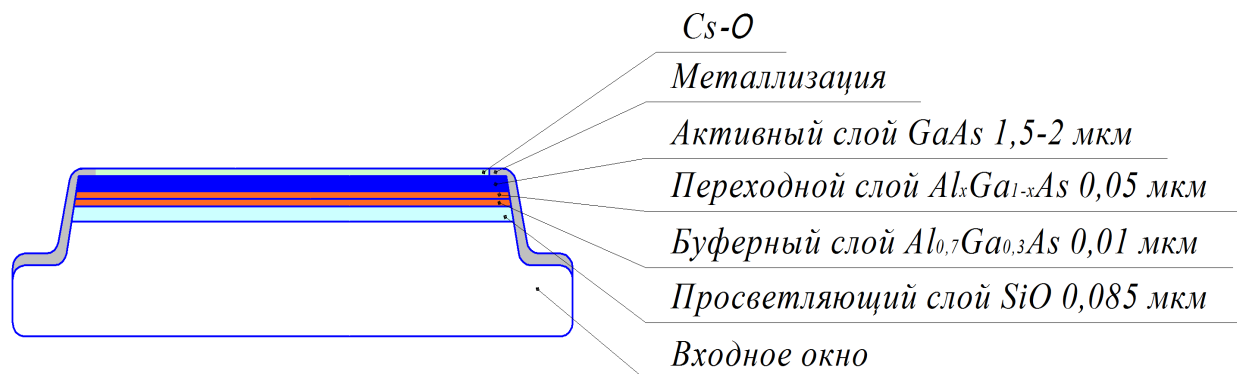


Хронографический ЭОП с GaAs – фотокатодом: фотокатодный узел

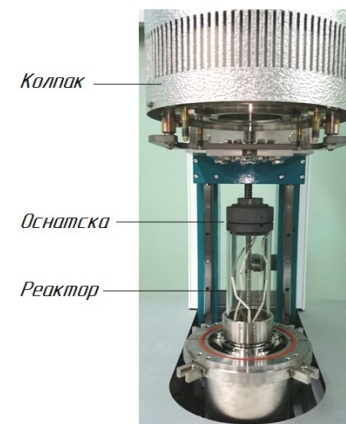


ВНИИА
РОСАТОМ

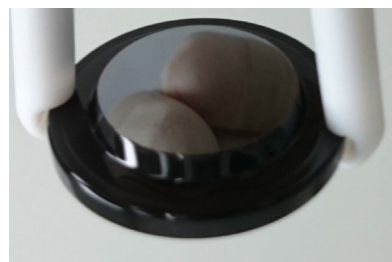
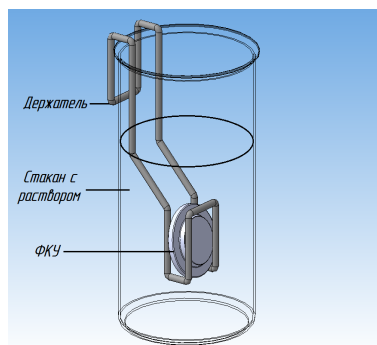
Схема фотокатодного узла



Термокомпрессия



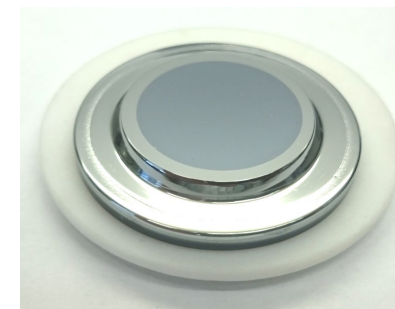
Удаление подложки и стопорного слоя



ХМД - полирование



Металлизация



Хронографический ЭОП с GaAs – фотокатодом: установка финишной сборки

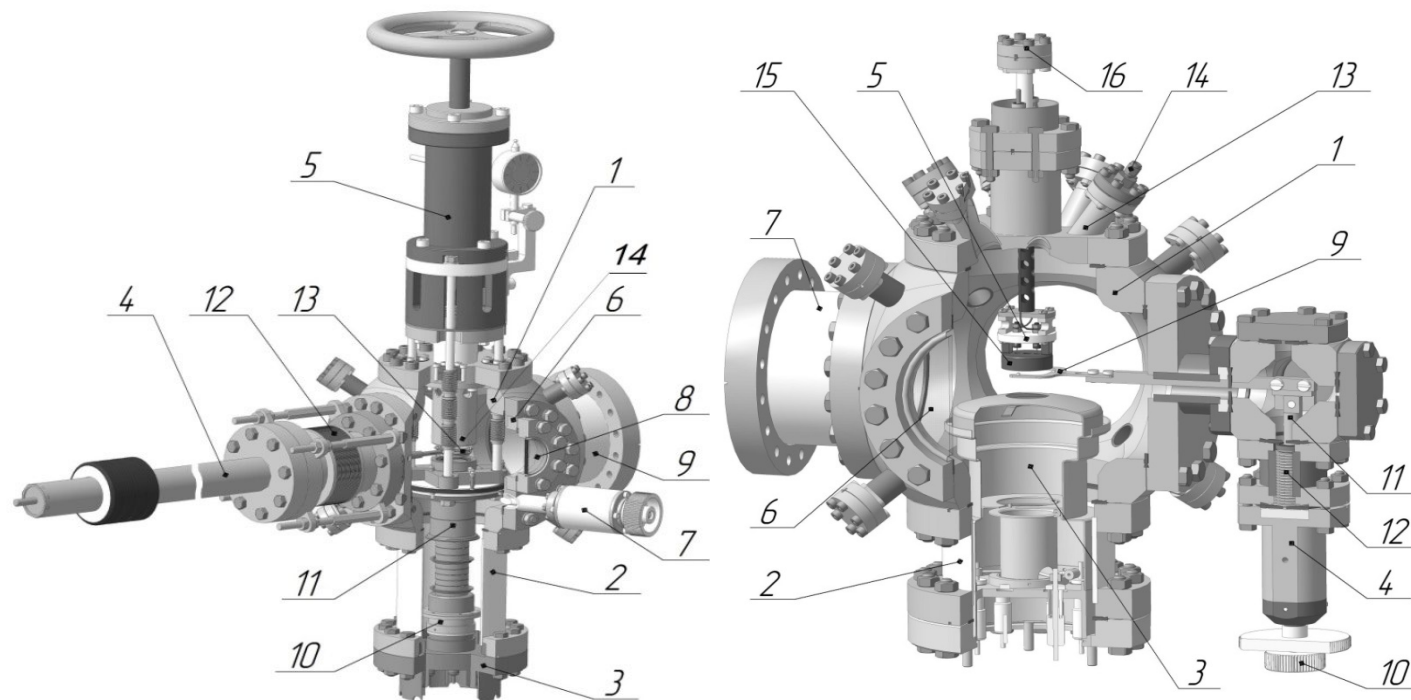


ВНИИА
РОСАТОМ

Общий вид установки



Устройство модулей установки



Хронографический ЭОП с GaAs – фотокатодом: ТПО41



ВНИИА
РОСАТОМ

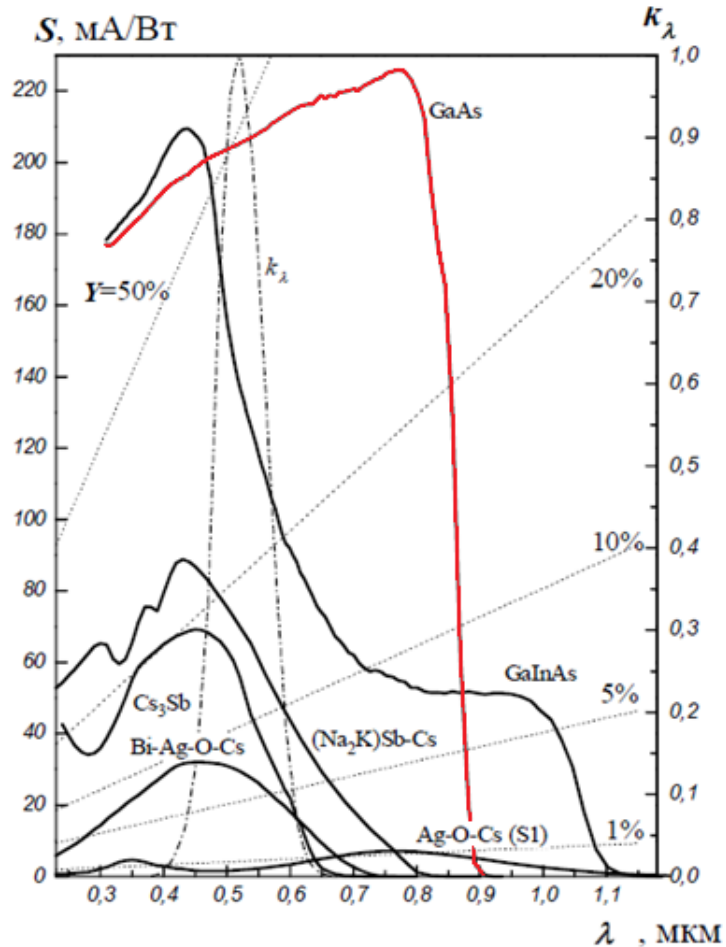


Наименование характеристик	«ВНИИА» Россия	«PHOTEK» Англия		«Photonis» Франция	
	ТПО41	ST-Y	C13410-01A	P820PM	P520PM
Тип фотокатода	АЗВ5	S20	S20	S20	S20
Световая чувствительность фотокатода, мкА/лм	800	информация отсутствует	информация отсутствует	информация отсутствует	информация отсутствует
Спектральная чувствительность фотокатода на длине волны 800 нм, мА/Вт	120	20	10	30	30
Спектральная чувствительность в максимуме характеристики, мА/Вт	120	50	60	50	50
Электронно-оптическое увеличение, отн.ед.	1,6	0,82	информация отсутствует	1,5	0,75
Пространственное разрешение по фотокатоду, штр/мм:	32 (по полю экрана)	25 (в центре катода)	18 (в центре катода)	25 (в центре катода)	20 (в центре катода)
Динамический диапазон регистрации при длительности процесса 350 пс и более, отн.ед,	2,4·10⁴	информация отсутствует	0,7·10 ⁴	информация отсутствует	2500
Расчетное предельное временное разрешение, пс	< 20*	30	5	2	5

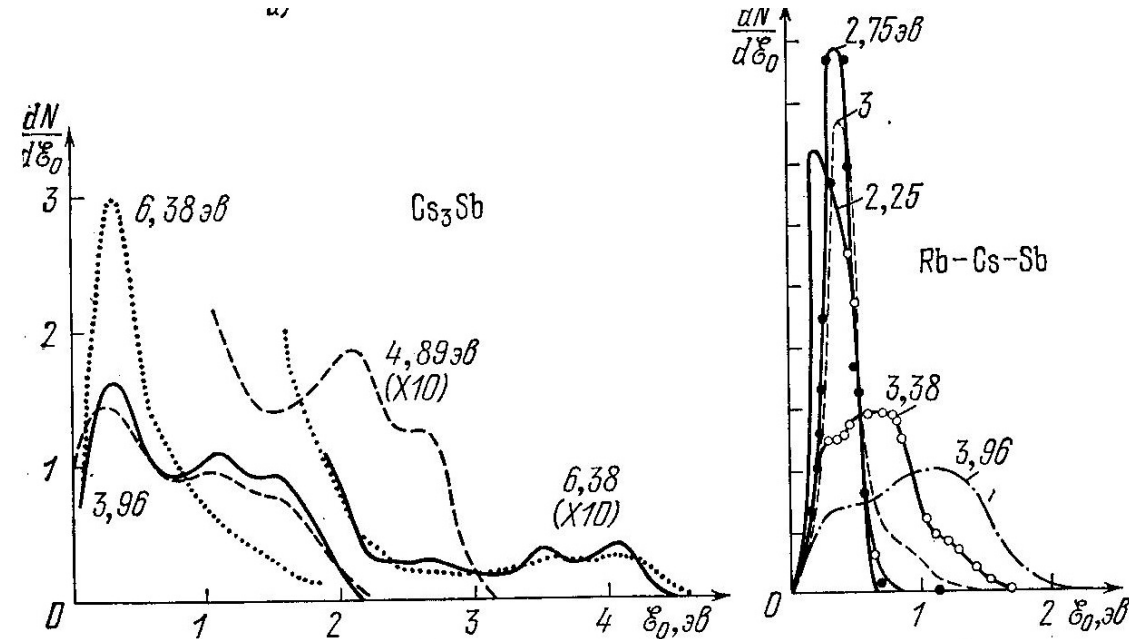
Хронографический ЭОП с АЗВ5-фотокатодом: ВОЗМОЖНОСТИ



Спектральные чувствительности фотокатодов



Энергетическое распределение для классических фотокатодов



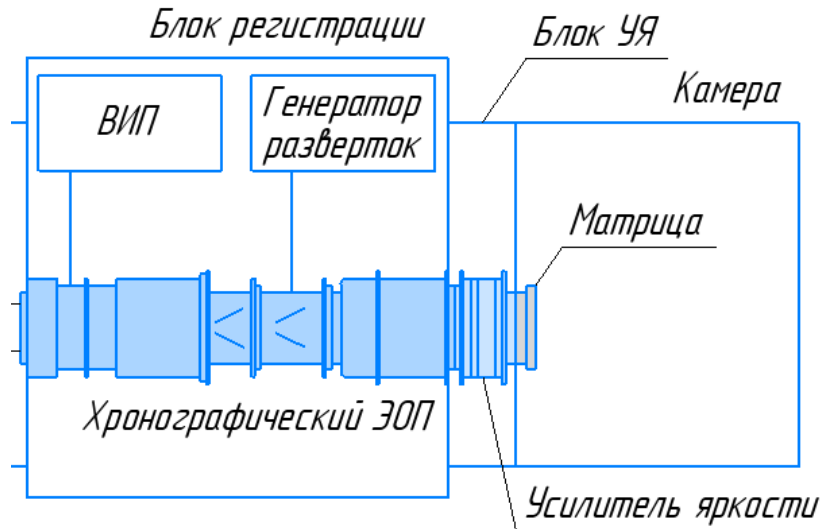
$$\Delta t_{\phi 2} = 2,34 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{\epsilon_0}}{E} \quad \text{- хроматическая aberrация}$$

Работа в районе красной границы!

Сочленение узлов ЭОР



ВНИИА
РОСАТОМ



Максимальный уровень отсчетов матрицы (верхний уровень ДД)

$$\text{Кпр хронографического ЭОП} * \text{Кпр планарного ЭОП}$$

Чувствительность хронографического ЭОП

Чувствительность планарного ЭОП

Коэффициент усиления МКП

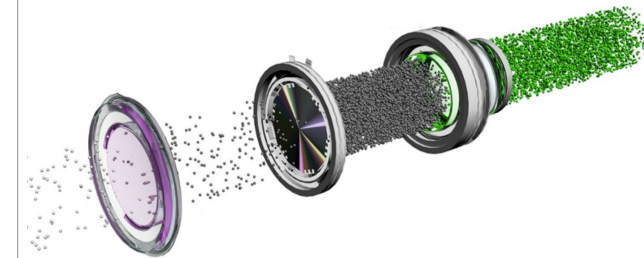
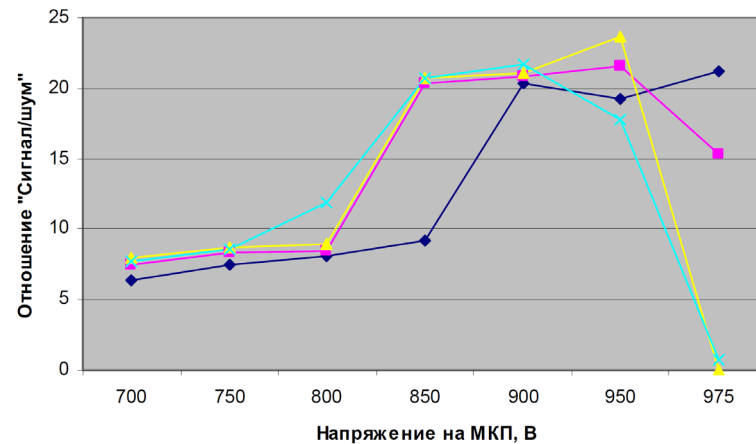
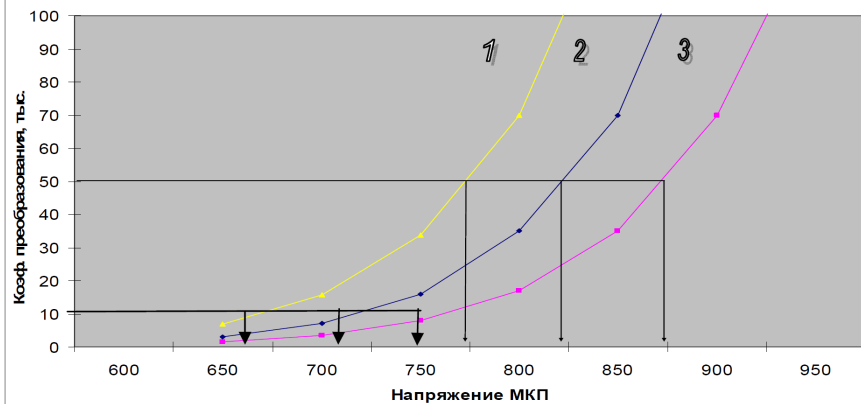
Световая отдача экрана

Световая отдача экрана

Напряжение питания МКП

Отношение сигнал/шум

Кпр от напряжения МКП

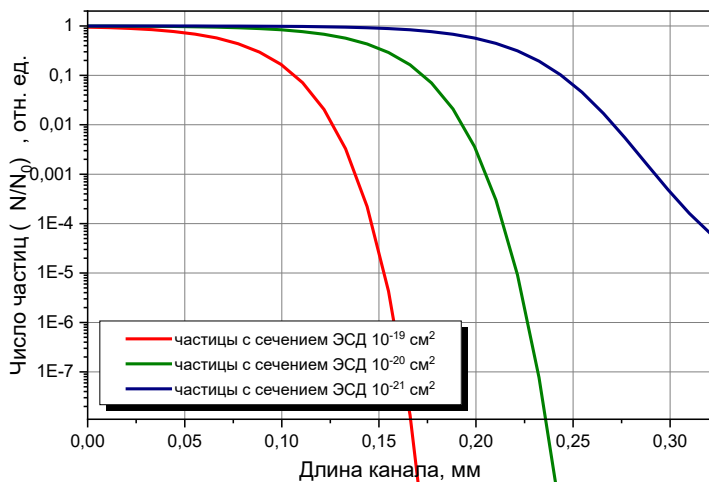
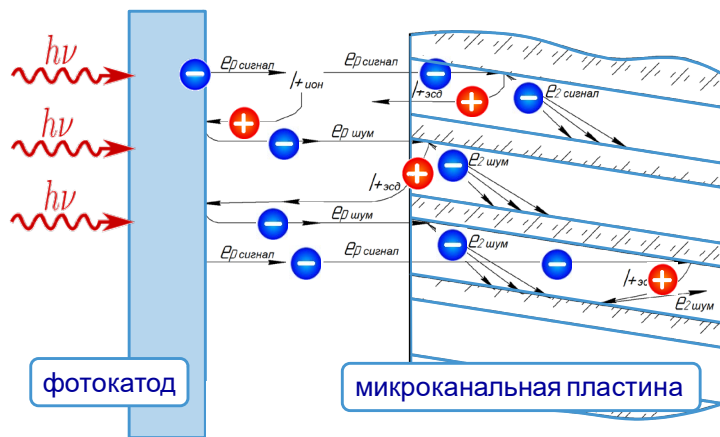


Двустороннее электронно-лучевое обезгаживание МКП

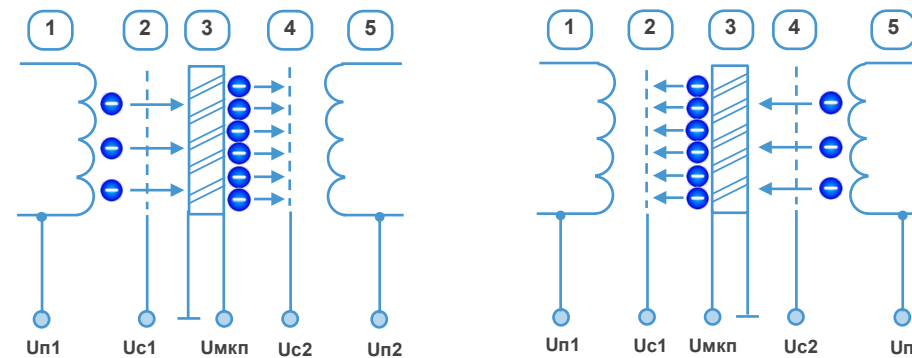


ВНИИА
РОСАТОМ

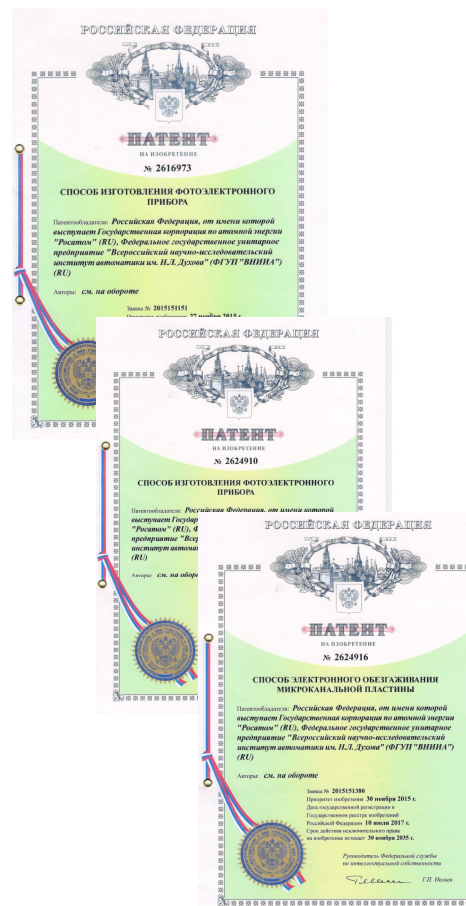
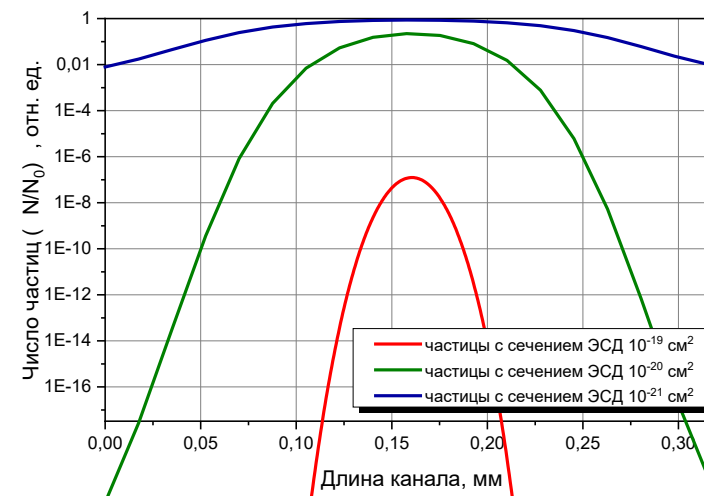
Электронно-лучевое обезгаживание МКП



Двустороннее электронно-лучевое обезгаживание



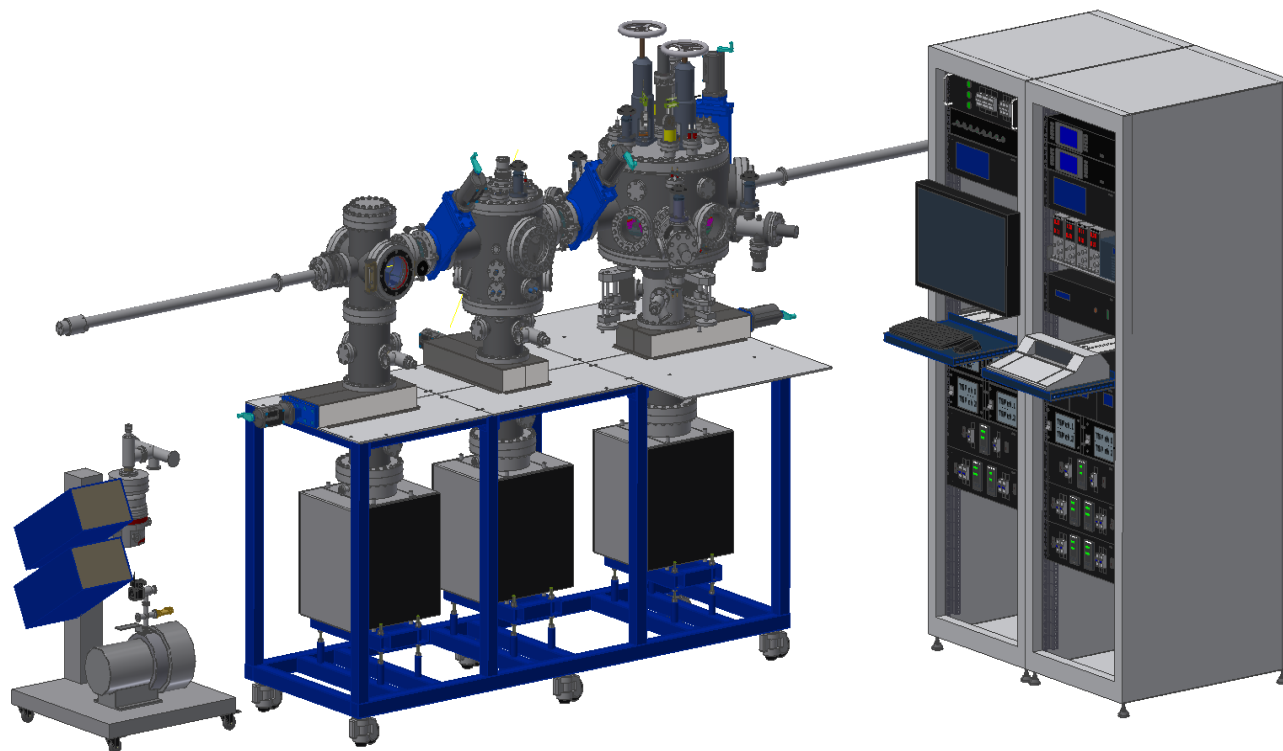
- 1 - электронная пушка 4 - вторая анодная сетка
2 - первая анодная сетка 3 - МКП 5 - электронная пушка



Установка финишной сборки бипланарных ЭОП с GaAs-фотокатодом с двусторонним обезгаживанием МКП



ВНИИА
РОСАТОМ



В разработке



Методы повышения динамического диапазона регистраторов:

1. Увеличение ДД хронографического ЭОП
 - Снижение объемного заряда и повышение напряженности поля за счет внедрения металлокерамического корпуса и метода переноса
 - Снижение объемного заряда за счет применения электронной оптики с ленточным пучком
 - Увеличение проводимости фотокатода за счет применения проводящей подложки
 - Увеличение проводимости и чувствительности фотокатода за счет внедрения АЗВ5 фотокатодов
2. Повышение отношения сигнал/шум ЭОП усилителя яркости
 - Внедрение АЗВ5 фотокатодов
 - Применение технологии двустороннего электронно-лучевого обезгаживания МКП

Коновалов Павел Игоревич

+7 985 211 00 38, p_konovarov@mail.ru

22-26 мая 2023 г.