

Введение в технику физического эксперимента

Лектор – проф. Пальчиков Евгений Иванович

ВТФЭ-2016

Фотометрия, колориметрия, фотоника

Оптические измерения

Пальчиков Евгений Иванович
д.т.н., проф. НГУ, в.н.с. ИГиЛ

*Новосибирский Государственный университет
Сибирское Отделение Российской академии Наук*

Лекция № 12÷13 – 06.12.2016, НГУ, БФА

© Пальчиков Е.И., 2016

© Новосибирский государственный университет, 2016

Фотоника

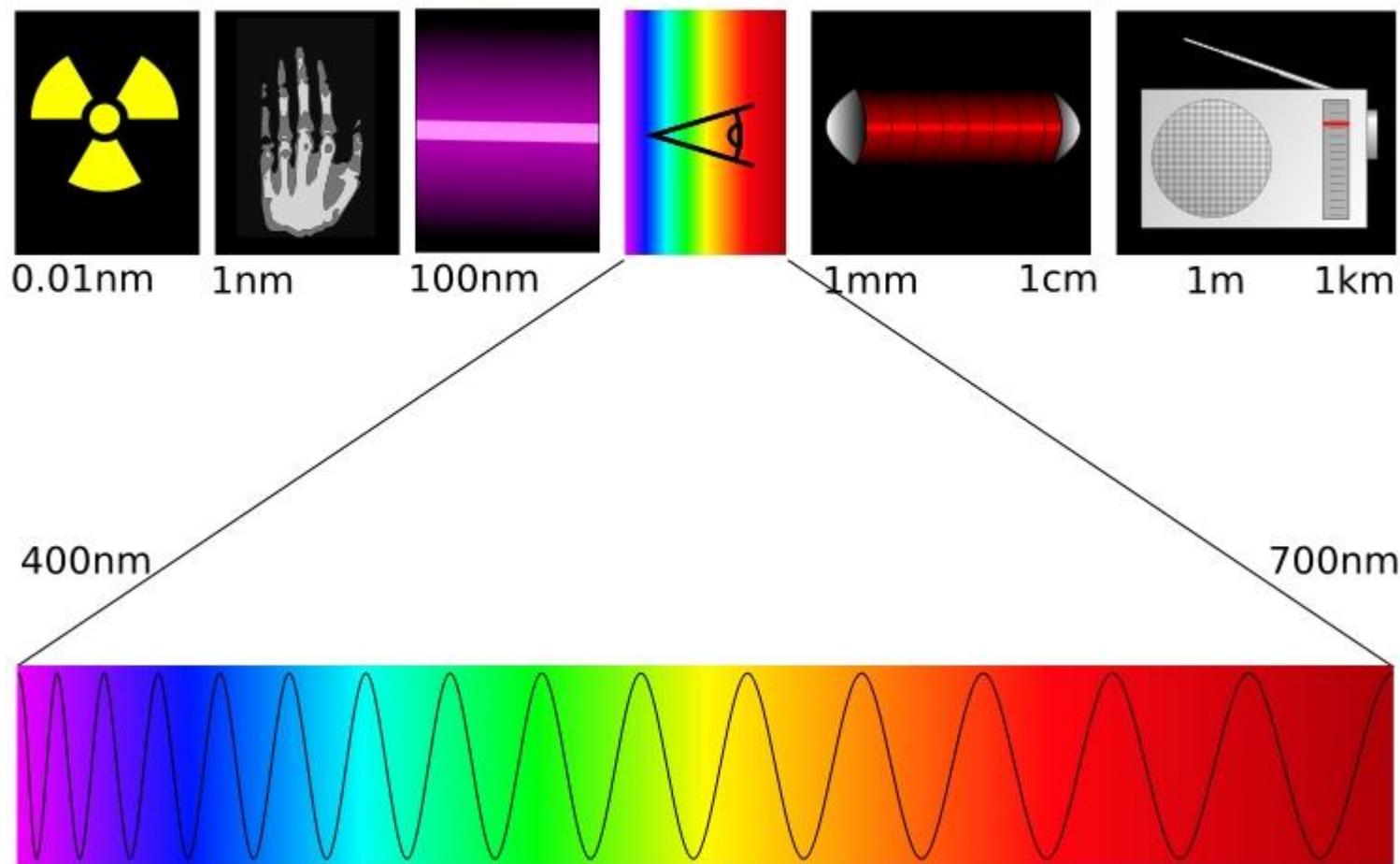
Фотоника – Область физики, техники и электроники, использующая фотоны для переноса энергии и информации

- Источники света (излучения)
- Приемники света (детекторы)
- Модуляторы
- Дефлекторы
- Оптические процессоры

Источники света

- **Равновесное излучение нагретых тел** – Планковское излучение
Солнце, лампы накаливания, открытое пламя, все конденсированные и все непрозрачные тела
- **Люминесценция** – квантовые переходы в конденсированных средах с излучением в виде широких спектральных полос (возбуждение: оптическое рентгеновское излучение, хим. реакция, инжекция электронов – внутренняя и внешняя)
Полупроводники $A^III B^V$, $A^II B^VI$ (светодиоды), люминофоры, растворы красителей, лампы дневного света
- **Излучение сильно нагретых газов** (ионизованной плазмы) – полосатый линейчатый спектр с узкими линиями
Неоновая реклама, лампы-вспышки, бактерицидные ртутные лампы, натриевые лампы (желтые лампы для уличного освещения)
- **Явление LASER** – генерация когерентных фотонов за счет «усиления света путем вынужденного испускания излучения» атомами (ионами) среды
Одиочная узкая линия когерентного излучения
Лазеры, космические объекты с инверсной заселенностью
- **Тормозное излучение** ускоренных (затормаживаемых) зарядов
Синхротронное излучение, лазеры на свободных электронах, космические объекты с присутствием магнитных полей и потоков частиц

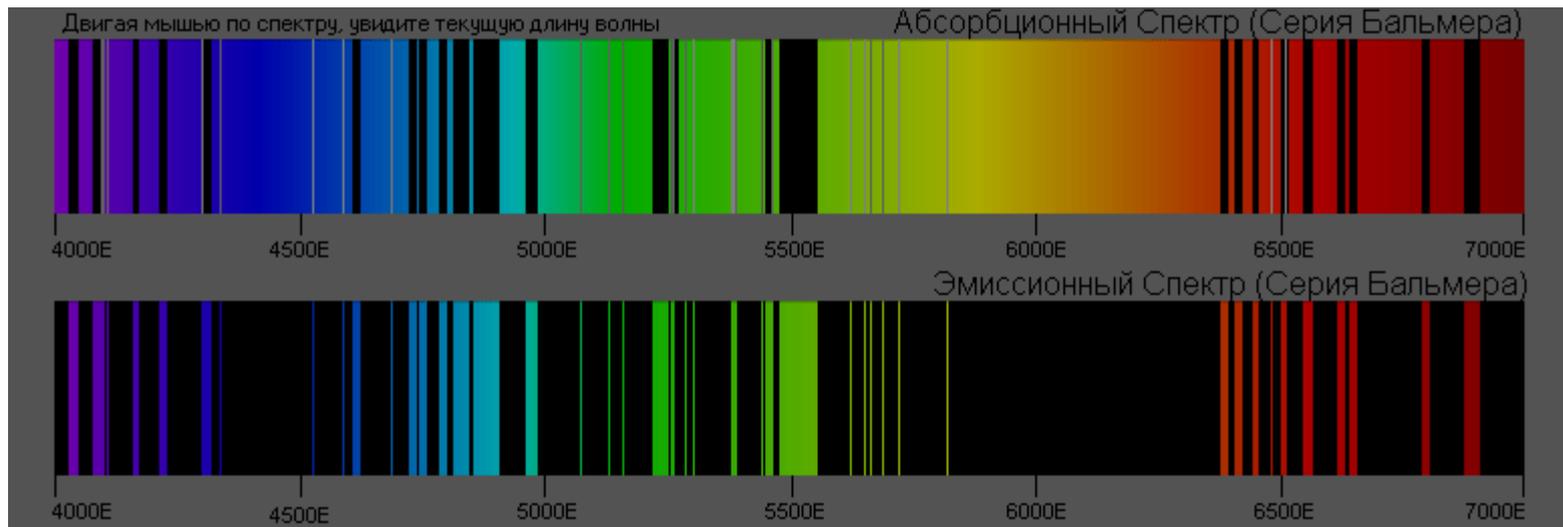
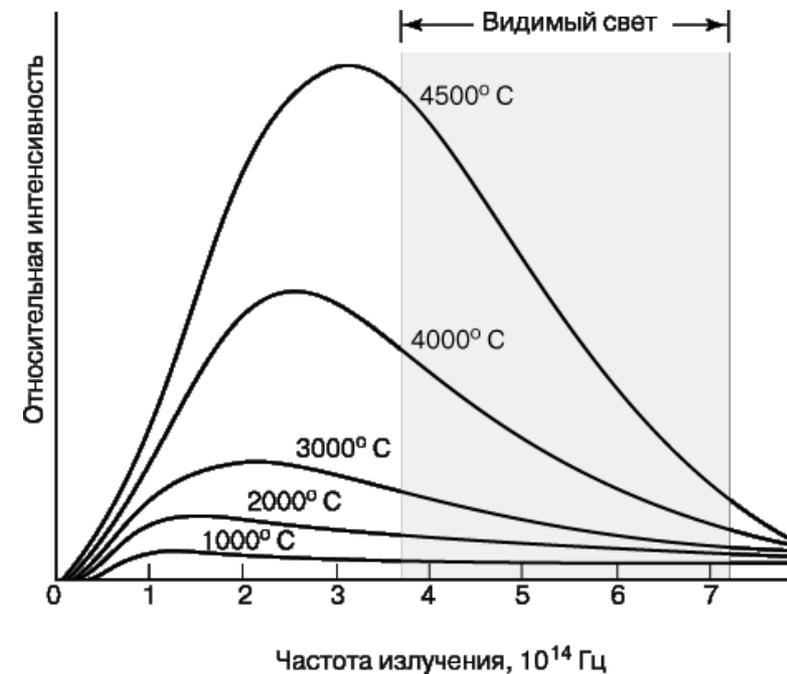
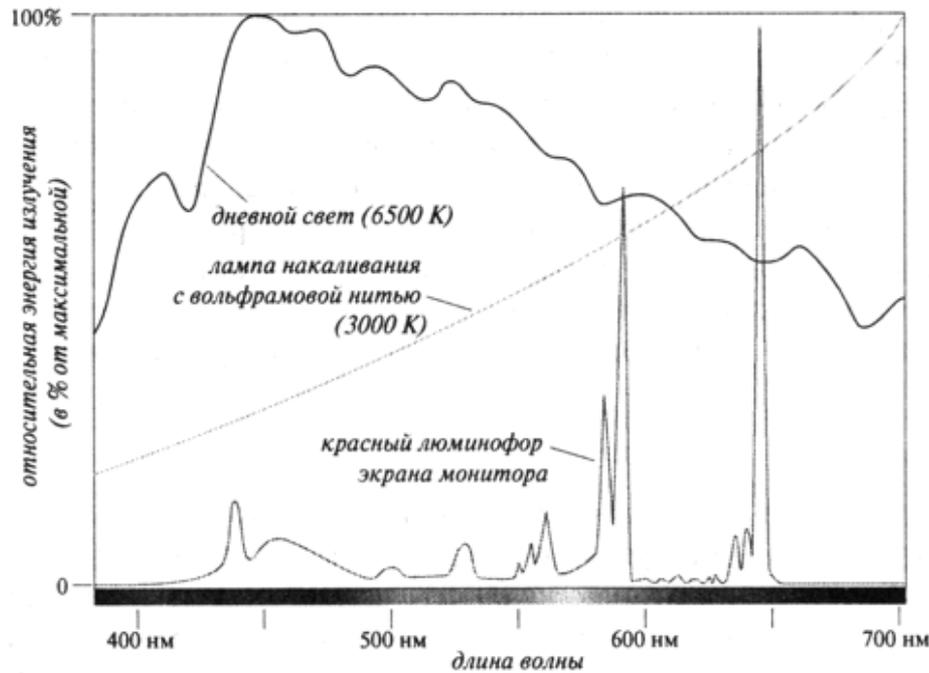
Деление электромагнитного излучения на диапазоны



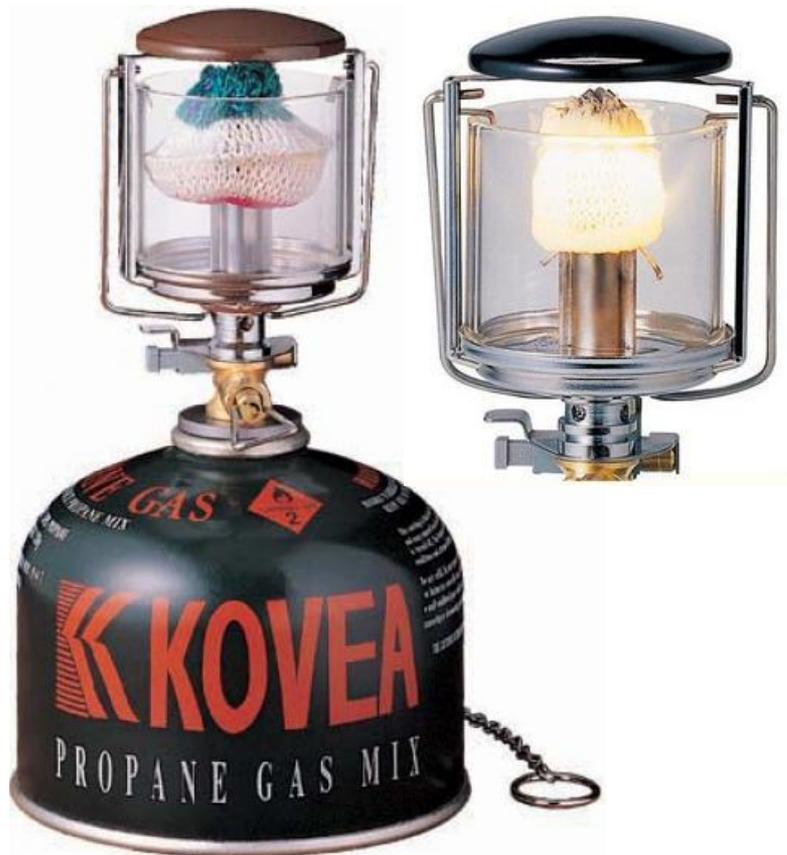
Сравнение мощности и эффективности некоторых источников света

Источник	Мощность, Вт	Примерная сила света, кд
Свеча		1
Современная (2006 г) лампа накаливания	100	100
Обычный светодиод	0.015	0.001
Сверхъяркий светодиод	2,4	12
Современная (2006 г) флуоресцентная (люминесцентная) лампа	20	100
Электродуговая ксеноновая лампа	до 100 кВт	
Лампа-вспышка	до 10 кВт	
Электродуговая ртутная лампа	до 300 кВт	
Лазер для термоядерного синтеза	10^{14}	
Ядерный взрыв (20Кт)	$2,1 \cdot 10^{21}$	
Термоядерный взрыв (50Мт)	$5,3 \cdot 10^{24}$	

Источники света. Нагретое тело. НТ плазма.

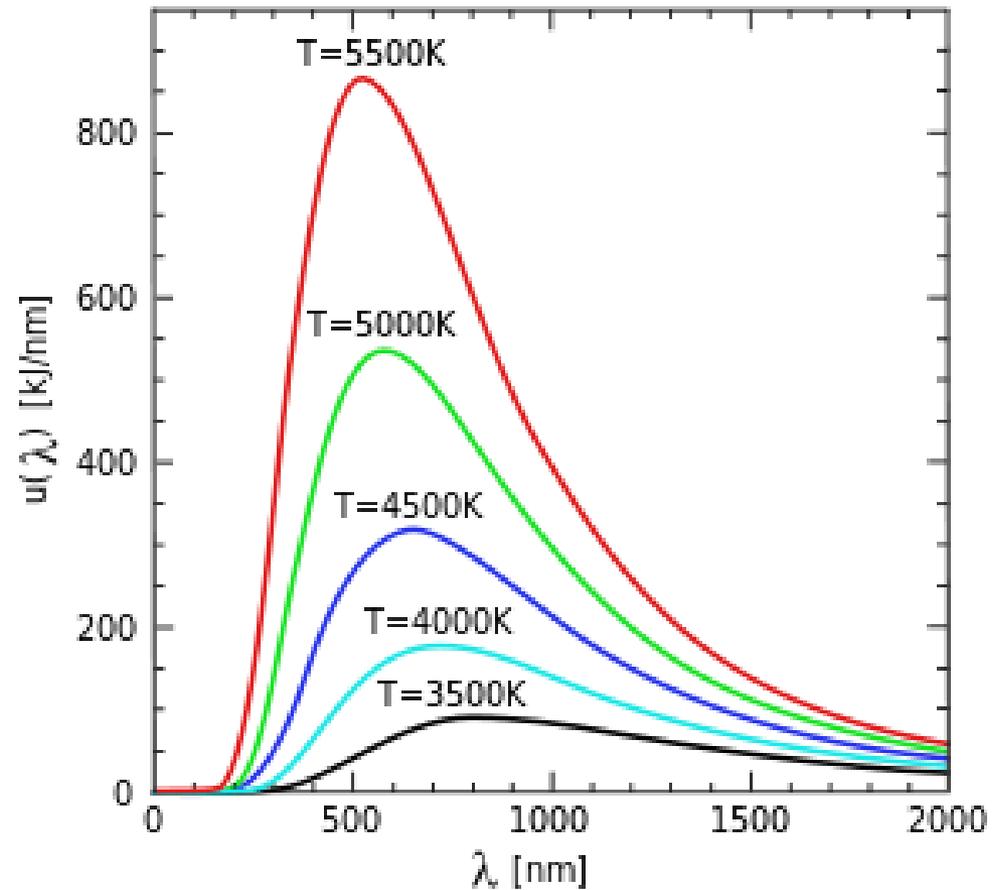
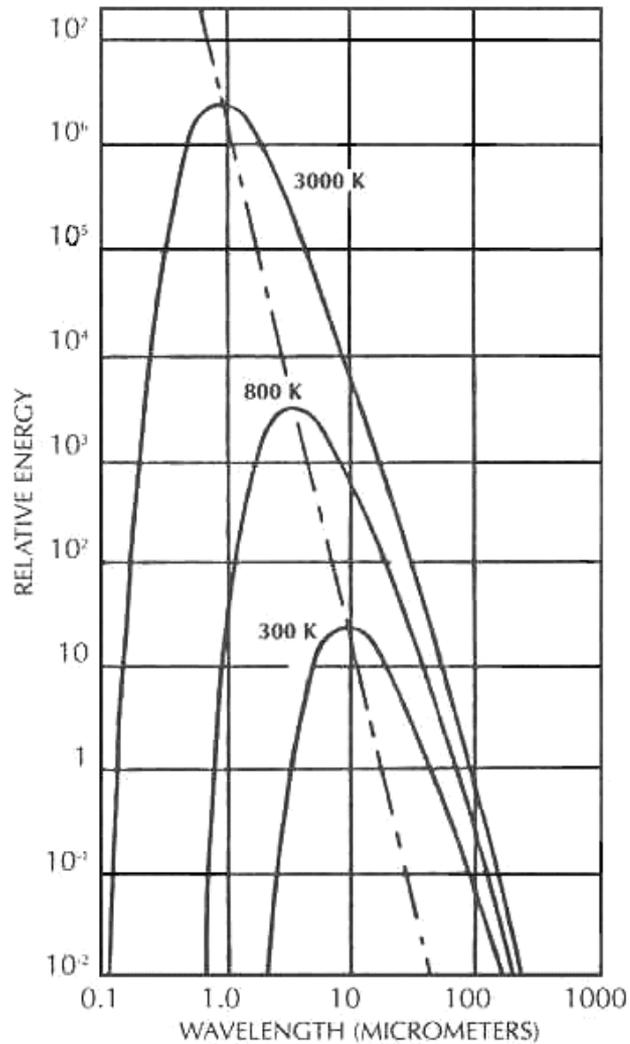


Источники света в виде нагретых тел

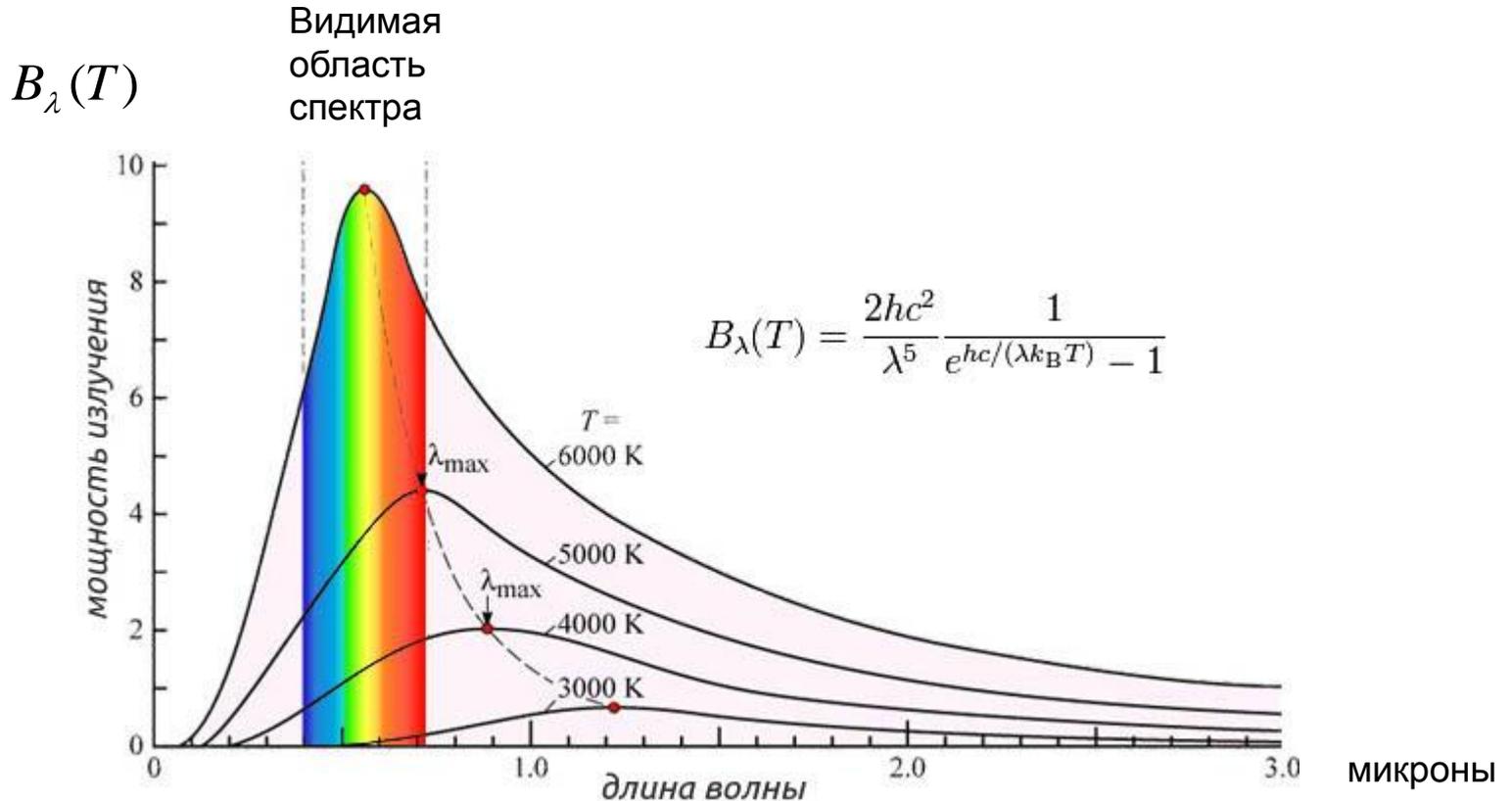


XIX век. Газовая лампа.
Уильям Тальбот,
Карл Ауэр фон Вельсбах.
99 % оксида тория + 1 % оксида церия

Интенсивность излучения как функция длины волны и температуры (Закон Планка)



Закон Планка



В спектре имеется единственный **максимум, положение** которого определяется **законом Вина.**

Площадь под кривой соответствует суммарной мощности излучения по **закону Стефана-Больцмана.**

Законы излучения нагретого тела

- Стефана-Больцмана $w = \sigma \cdot T^4$

- Вина $\lambda \cdot T^\circ = \text{const}$

- Закон для разреженной плазмы $w \sim \sqrt{T^\circ}$

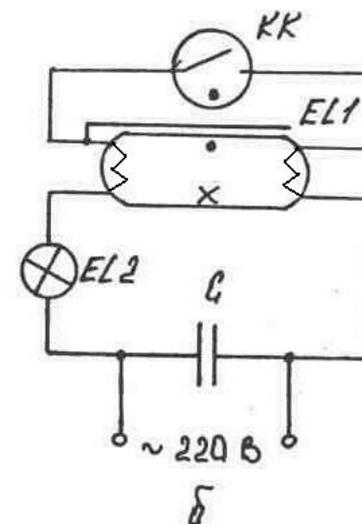
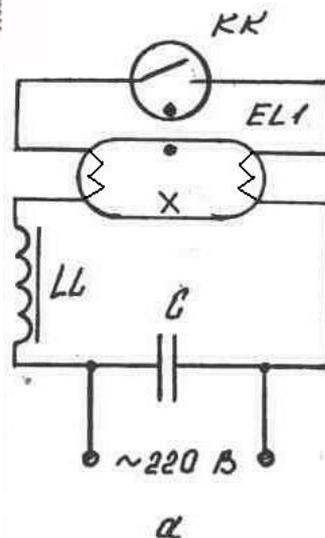
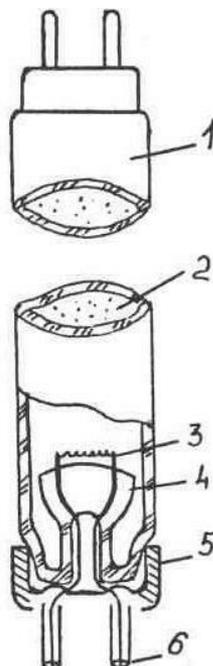
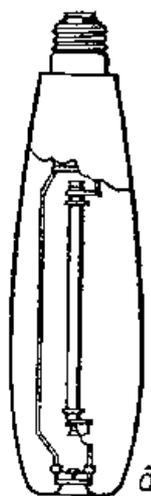
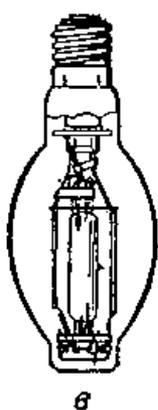
Люминесцентные газоразрядные источники света



ДРЛ лампа
25-50 лм/Вт



Натриевая лампа
100-150 лм/Вт



Металлогалогенная дуговая лампа

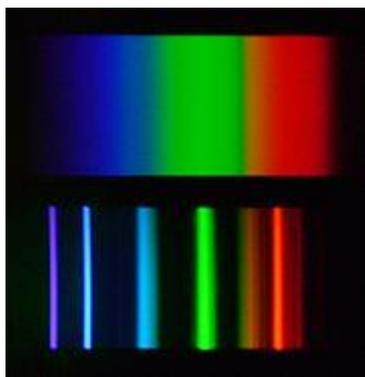
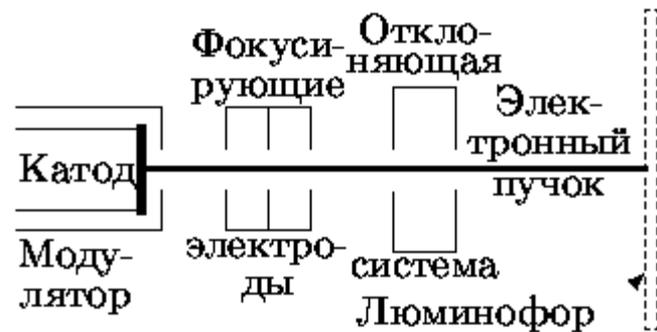
Ксеноновая дуговая лампа

Ртутная люминесцентная лампа

Полупроводниковые люминесцентные источники света на p/n – переходах и с возбуждением электронным пучком

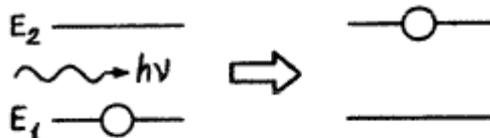


125 лм/Вт

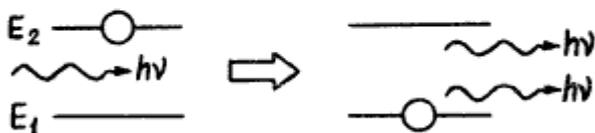


Лазеры

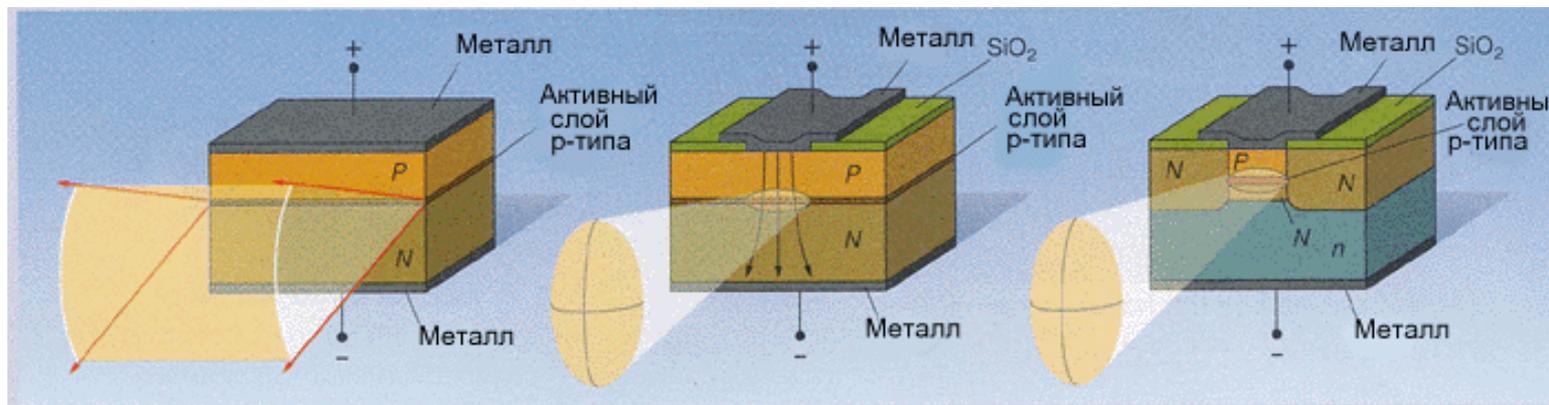
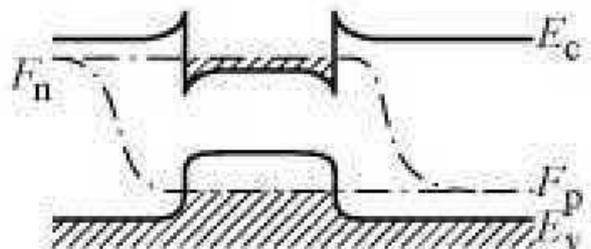
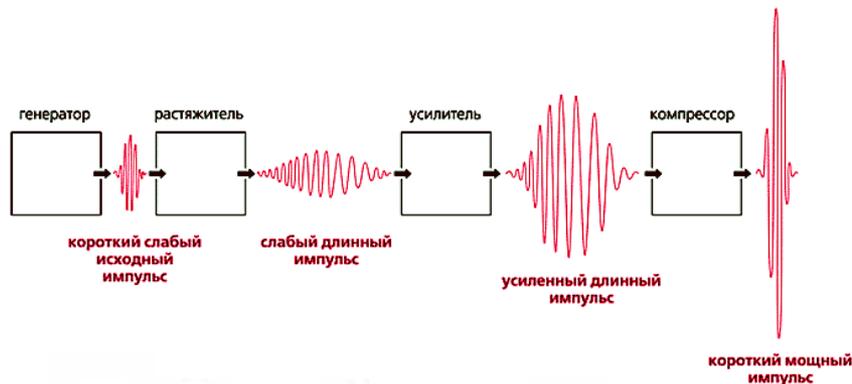
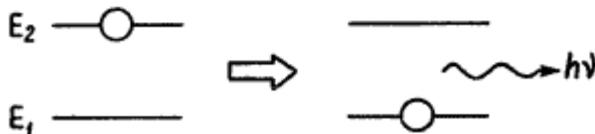
Поглощение света



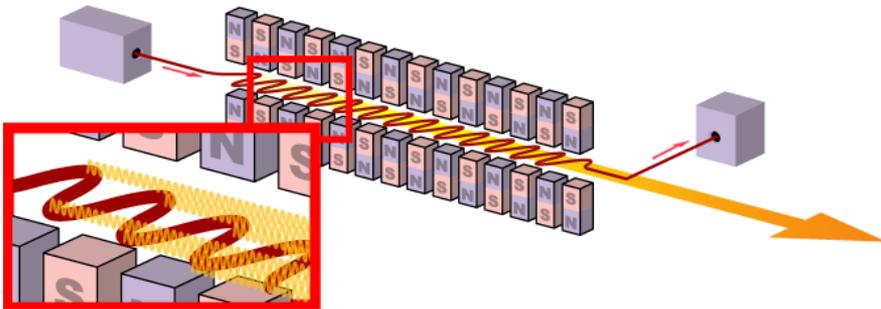
Вынужденное испускание света



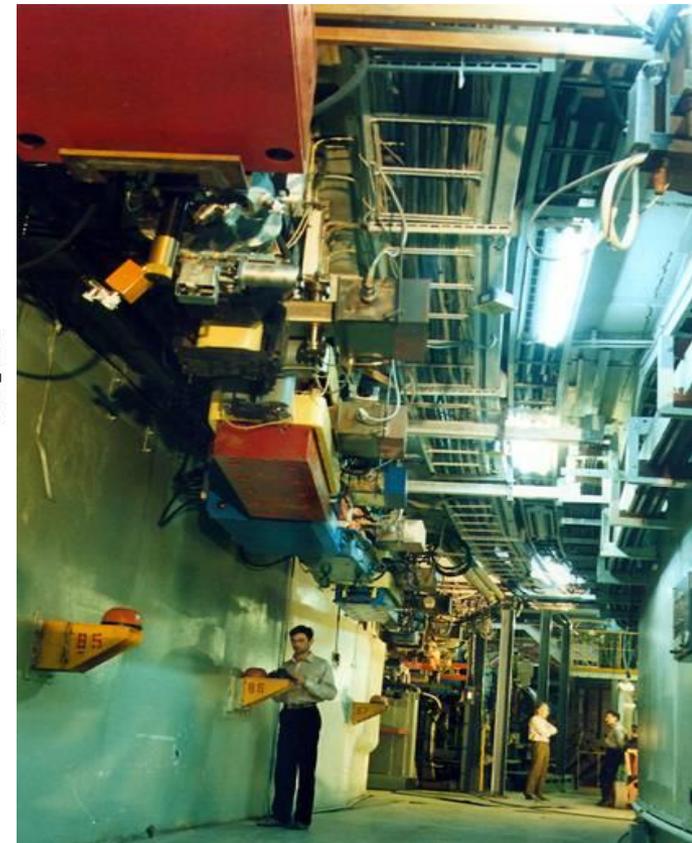
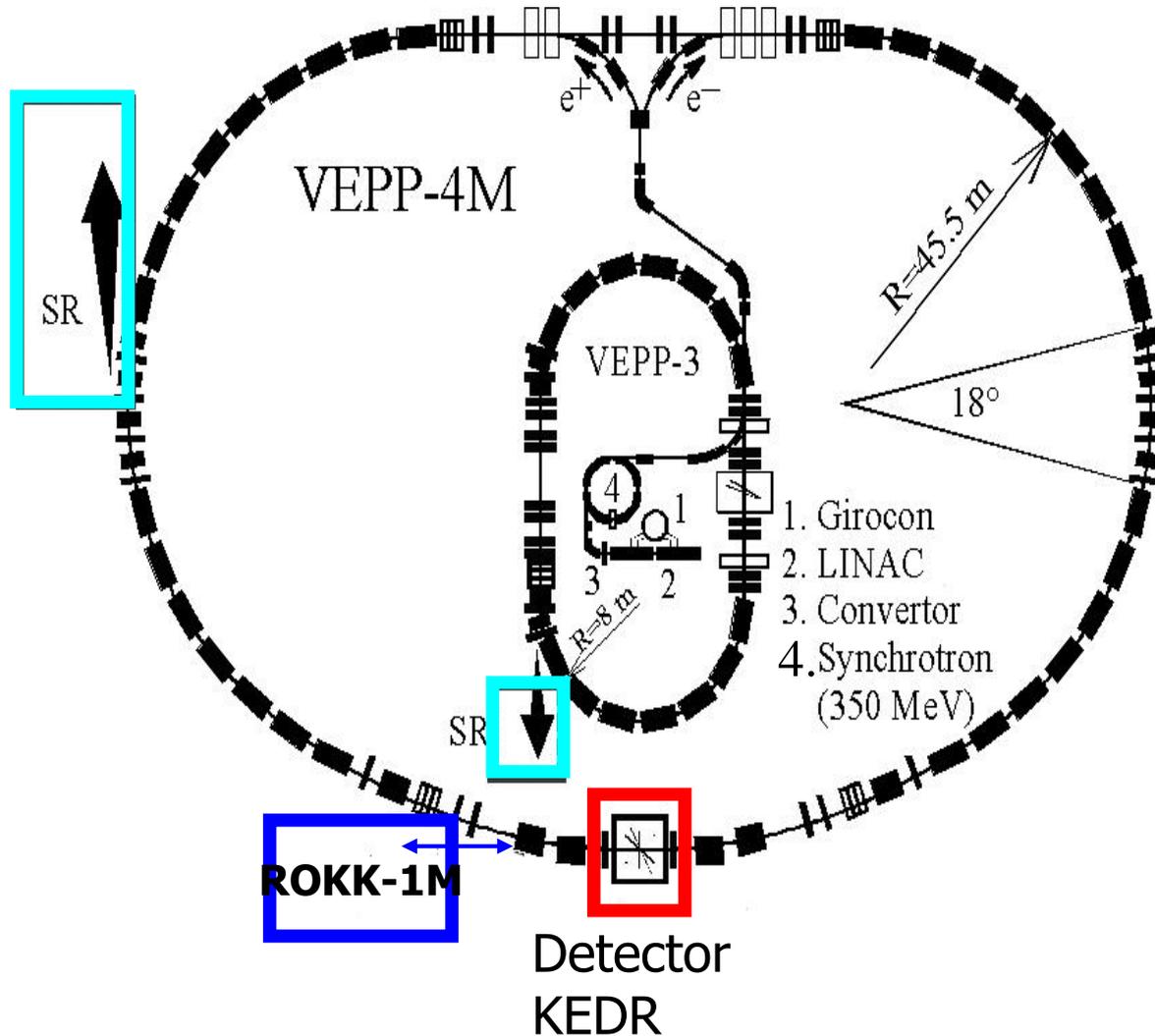
Спонтанное испускание света

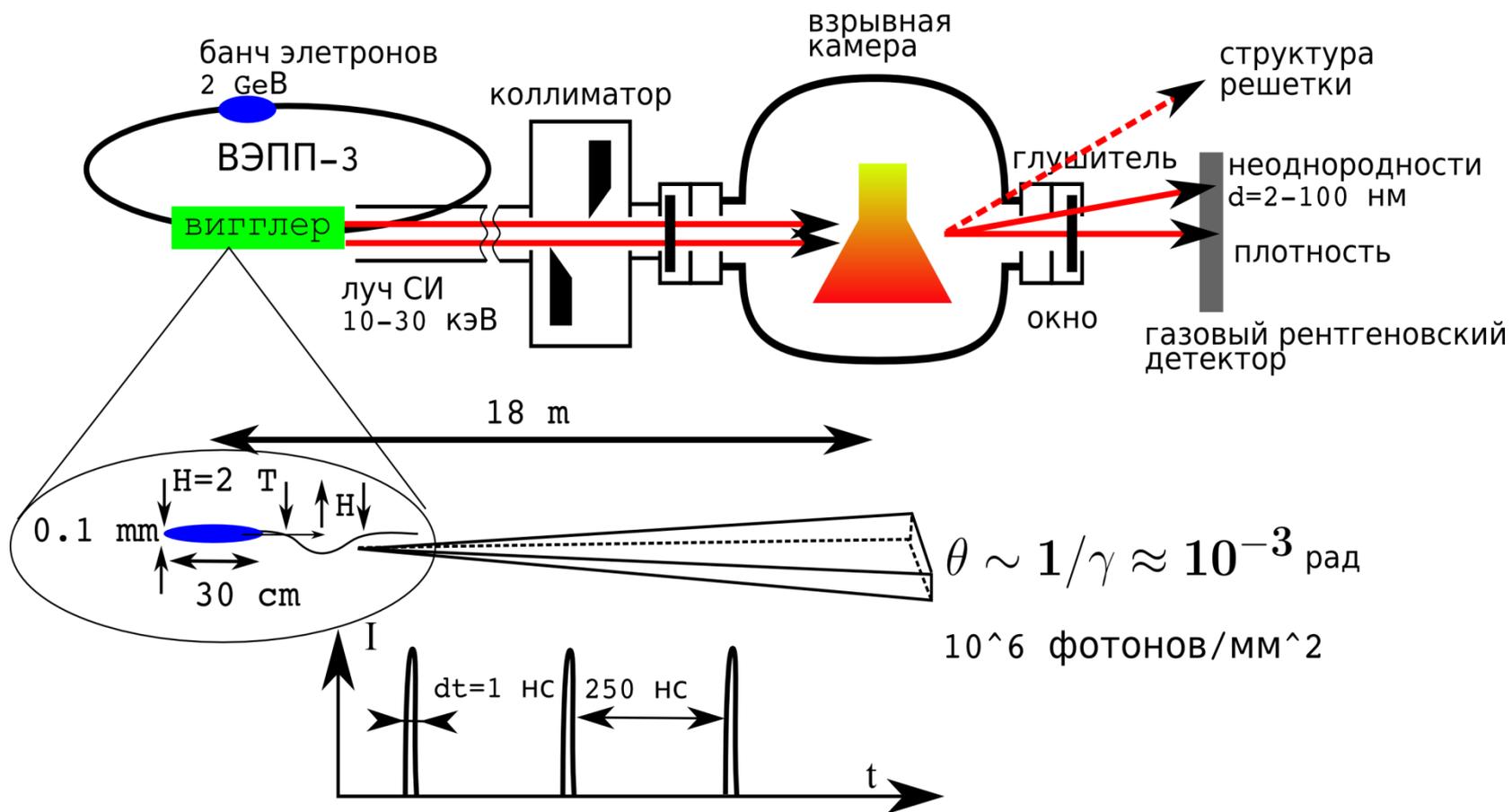


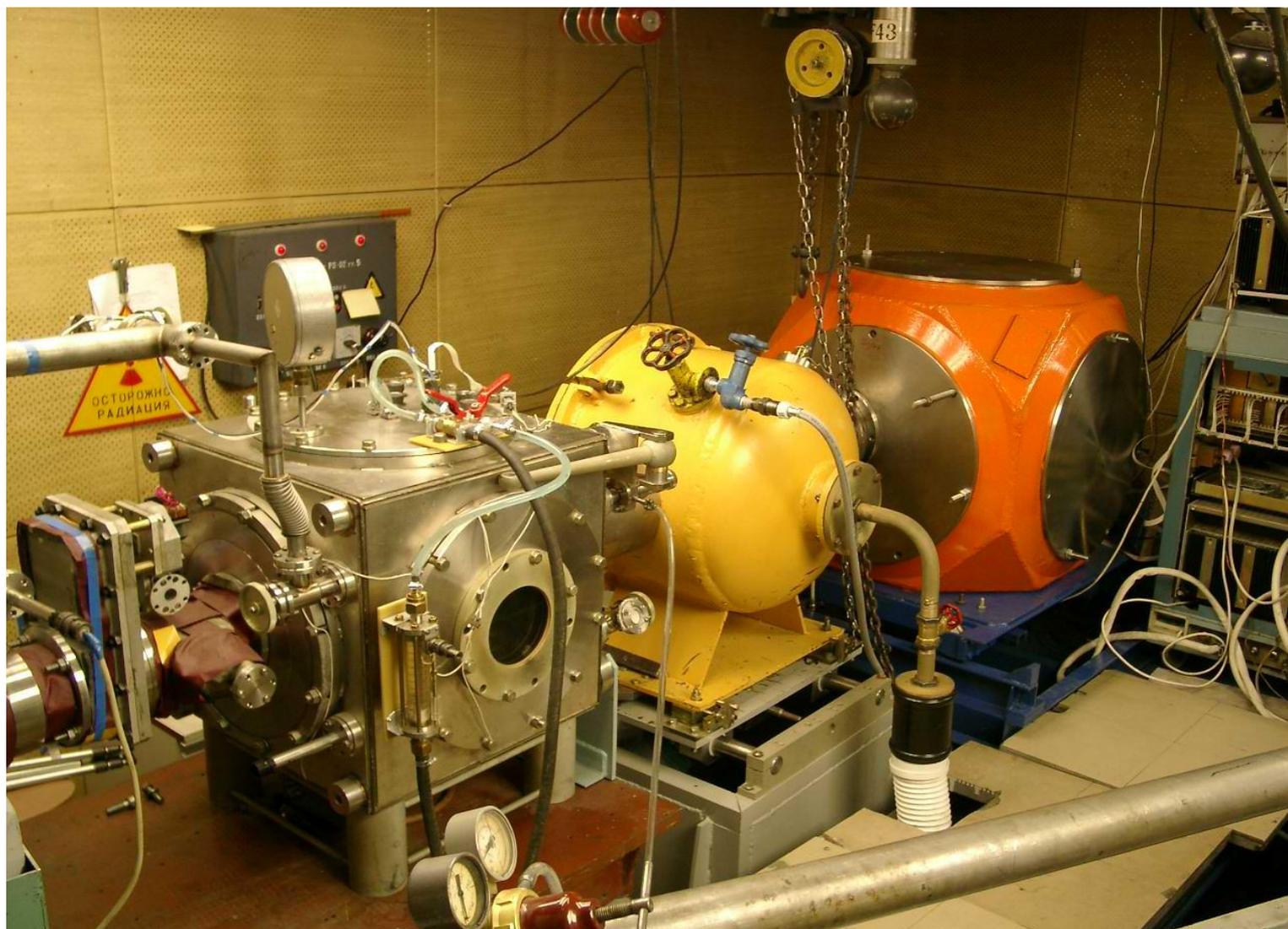
Синхротронное излучение. Лазер на свободных электронах. Терагерцовое излучение



Комплекс ВЭПП-3 - ВЭПП-4 базовая установка для исследования детонационных процессов







Общий вид станда по исследованию детонационных процессов на 0-м канале накопителя ВЭПП-3..

Скоростная томография плотности

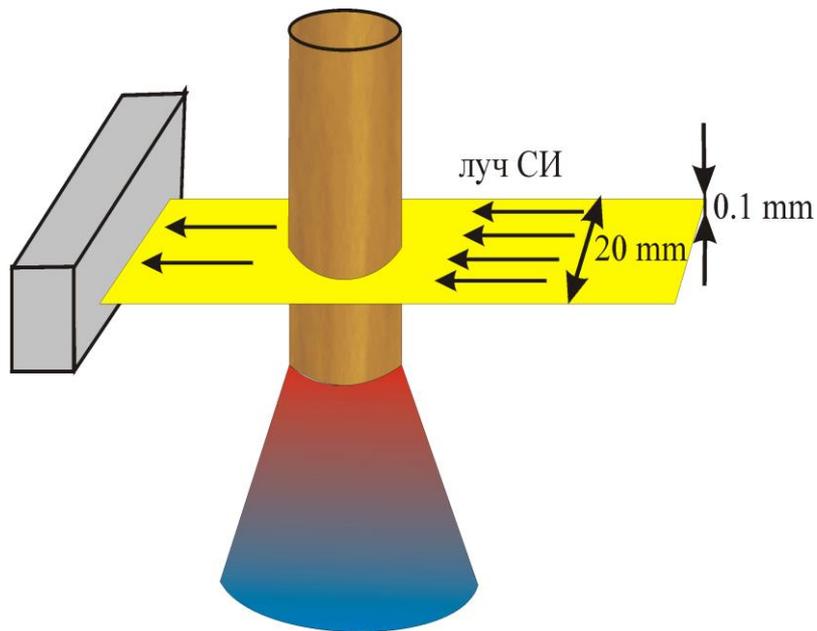
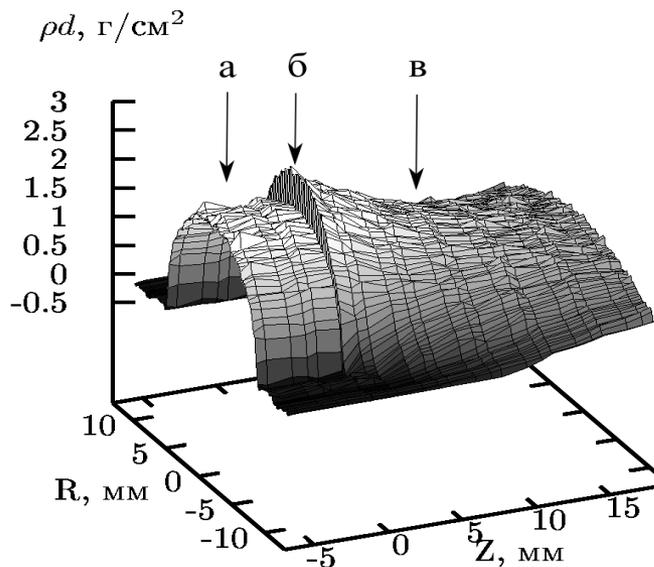
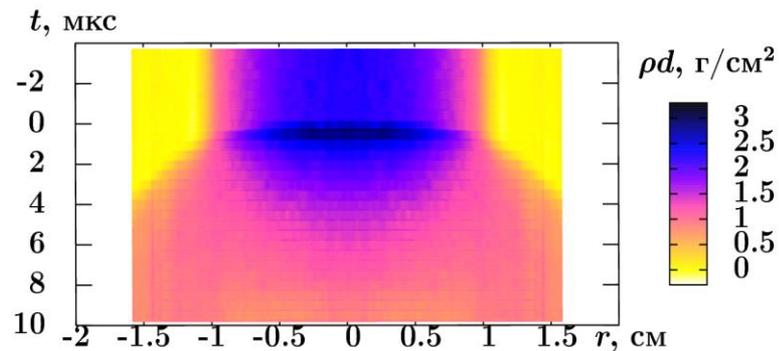


Схема эксперимента по определению плотности.



Рентгеновская тень $\rho d(r,t)$.

а – цилиндрический заряд до детонации.

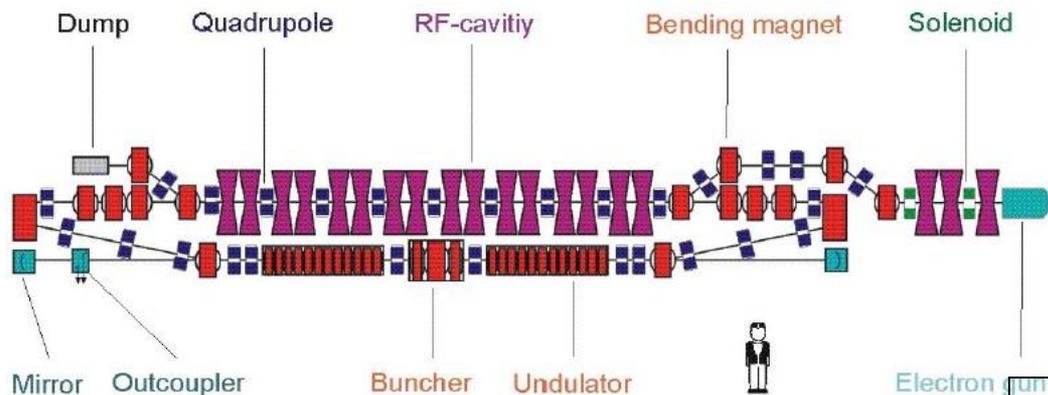
б – детонационный фронт.

в – разлет продуктов детонации.

Лазер на Свободных Электронах Сибирского центра фотохимических исследований и технологий СО РАН

Новосибирский ЛСЭ является самым мощным (по средней мощности) в мире источником терагерцового монохроматического излучения, что позволяет проводить с его помощью уникальные исследования по физике, химии, биологии и др. отраслям науки.

Энергия электронного пучка, МэВ	12
Частота ВЧ-системы, МГц	180,4
Частота следования сгустков, МГц	11,75
Средний ток, мА	20
Максимальная средняя выводимая мощность лазерного излучения, Вт	400
Диапазон перестройки длин волн, мкм	120-235
Ширина спектра излучения $\Delta\lambda/\lambda$, (минимальная)	$3 \cdot 10^{-3}$
Эффективность рекуперации, %	>95



Исследование волн горения и детонации в газовых смесях с помощью терагерцового излучения лазера на свободных электронах.
ИЯФ, ИГиЛ, ИХКГ СО РАН



Общий вид на канал распределения пучка и рабочую станцию выхода пучка

Приёмники света

С внешним фотоэффектом

- Фотозлектронные умножители (ФЭУ)
- Вакуумные фотодиоды
- Электронно-оптические преобразователи (ЭОП ы)
- Диссекторы

С внутренним фотоэффектом

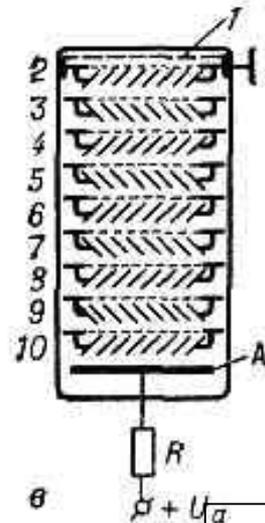
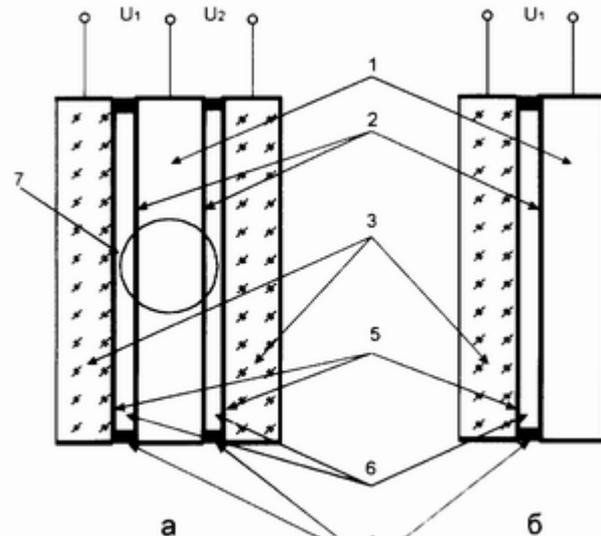
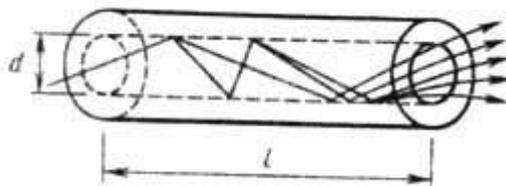
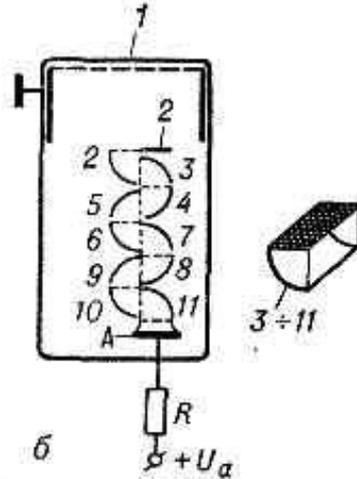
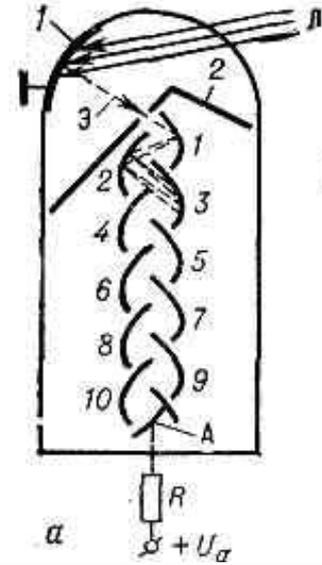
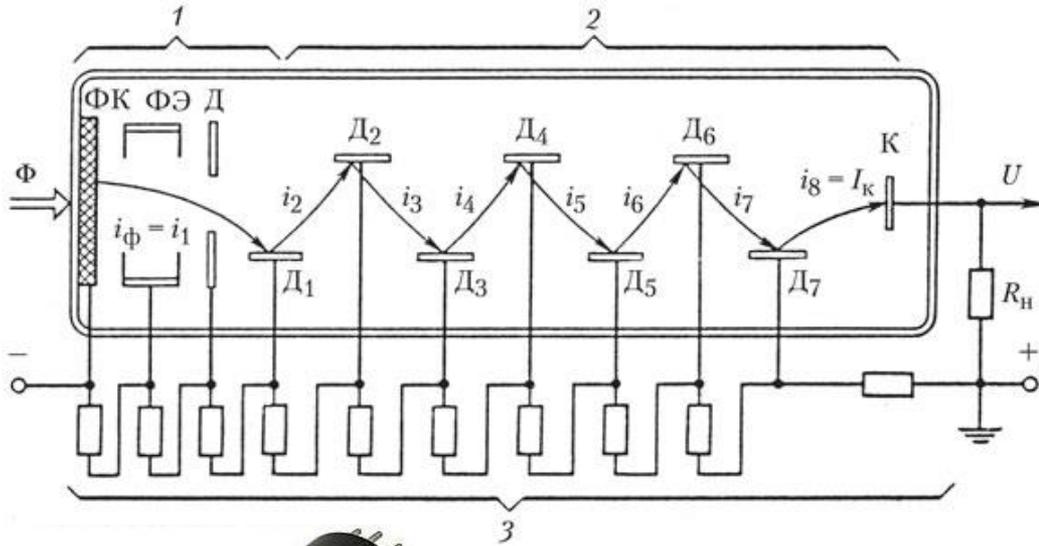
- Фотодиоды, ПЗС, CMOS камеры
- Фототранзисторы
- Фототиристоры
- Фотосопротивления
- Видиконы

Другие

- Боллометры
- Термостолбики (термопары)
- Оптико-акустические приемники (ОАП)
- Пироприёмники

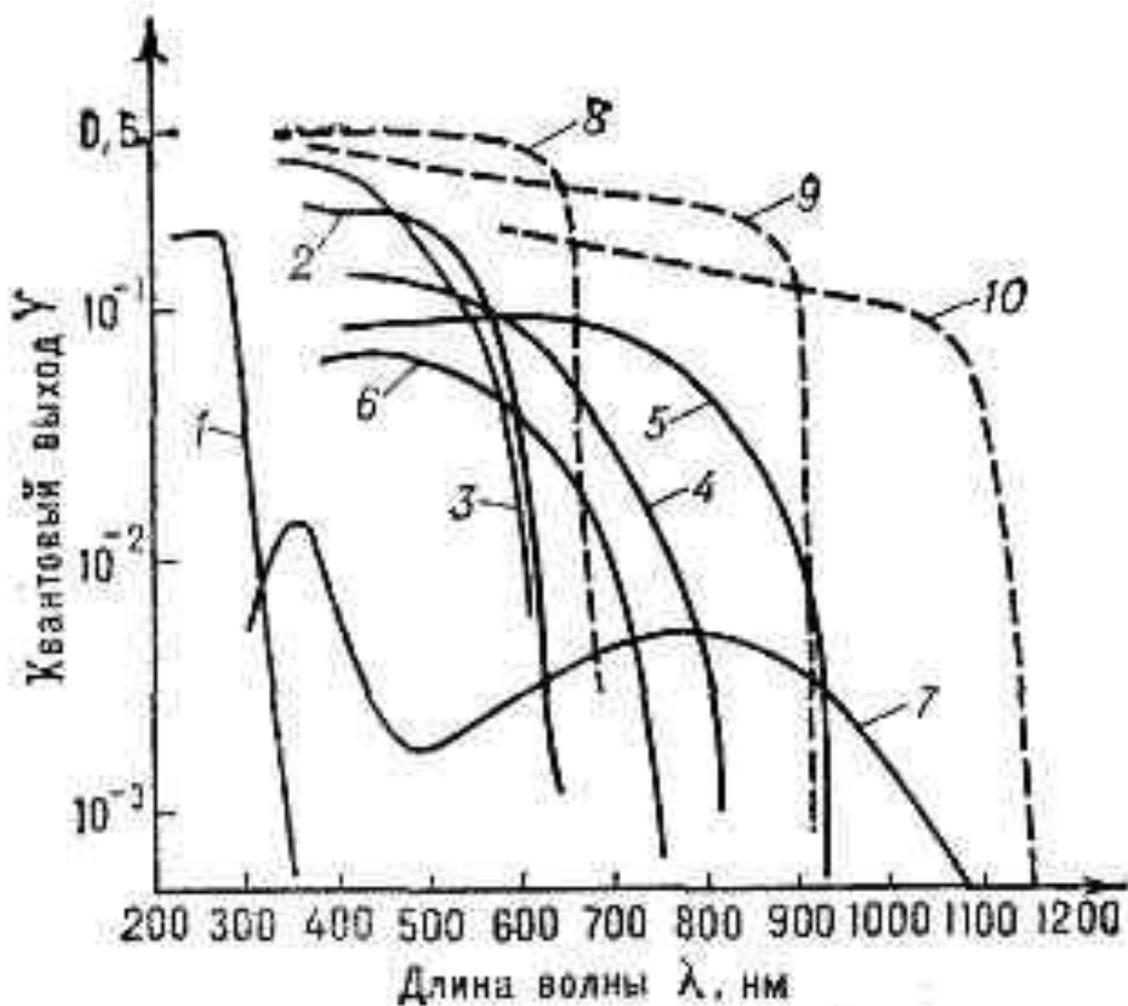
Фотоприемники. ФЭУ. ЭОП. МКП.

Внешний фотоэффект



ЭОП с МКП. Усиление сигнала в 40000 раз. Затвор $\sim 10^{-9}$ с

Спектральные характеристики фотокатодов



- 1) CsTe
- 2) Cs₃Sb
- 3) K₂CsSb
- 4) Na₂KS
- 5) Na₂KSb—Cs
- 6) Bi—Ag—O—Cs
- 7) Ag—O—Cs
- 8) GaAsP—Cs
- 9) GaAs—Cs, O
- 10) InGaAsP—Cs, O

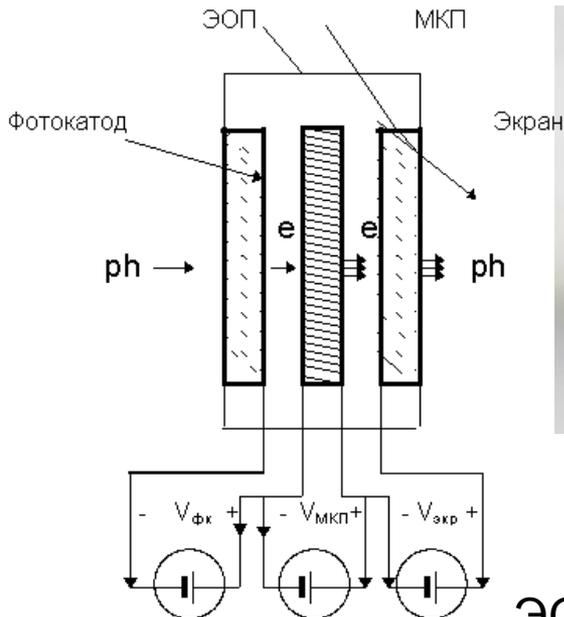
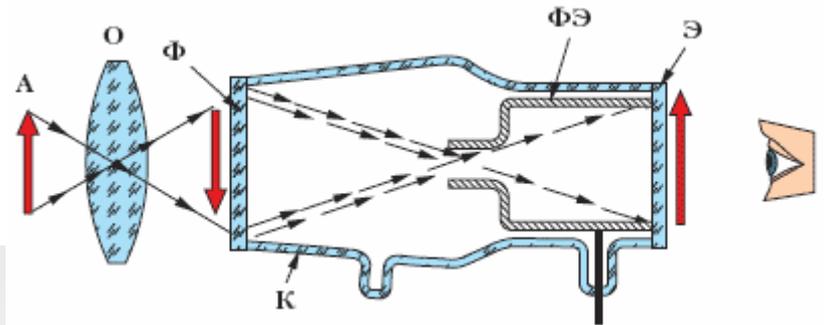
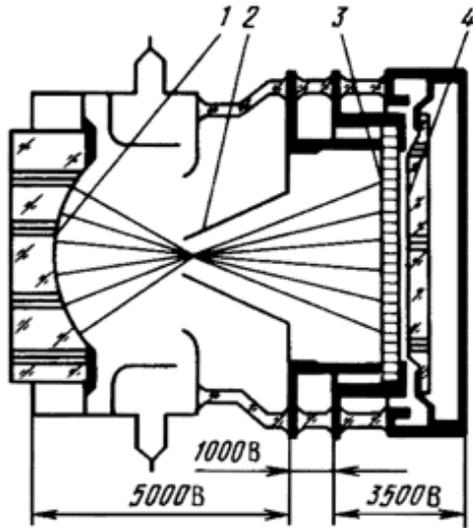
Пунктиром – с отрицательным электронным средством

1 поколение



ЭОПы

2 поколение



$V_{\text{вых МКП}}$

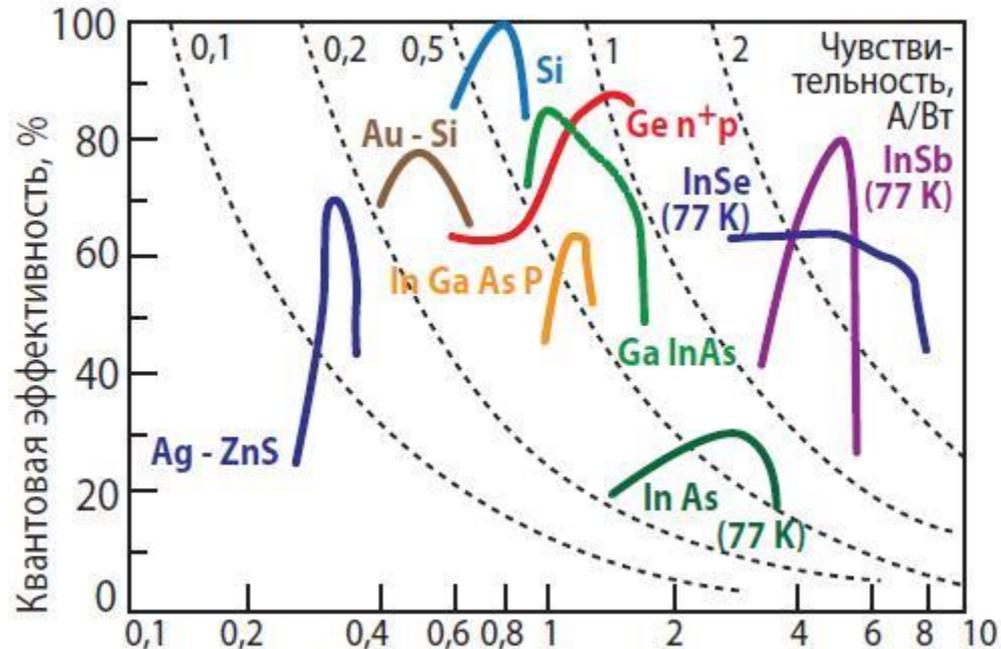
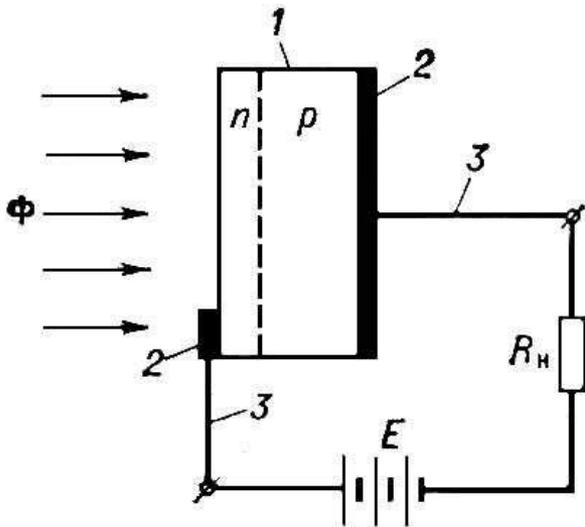
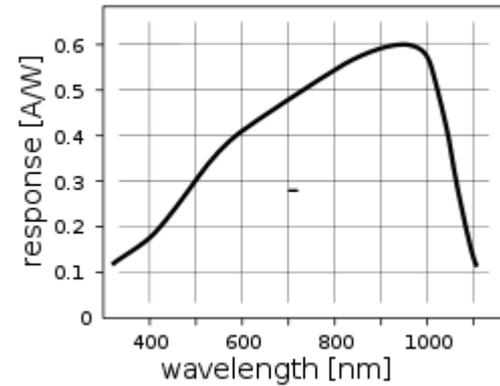
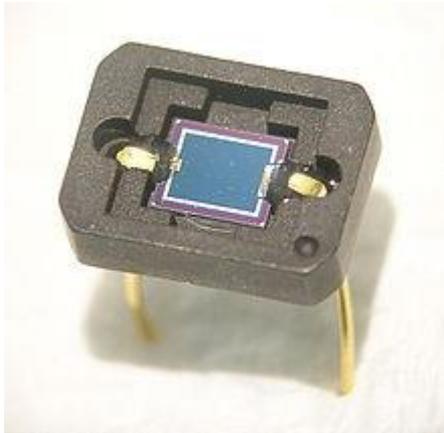
3 поколение



ЭОП с МКП. Усиление сигнала в 40000 раз. Затвор $\sim 10^{-9}$ с 23

Фотоприемники. Фотодиод

Внутренний фотоэффект

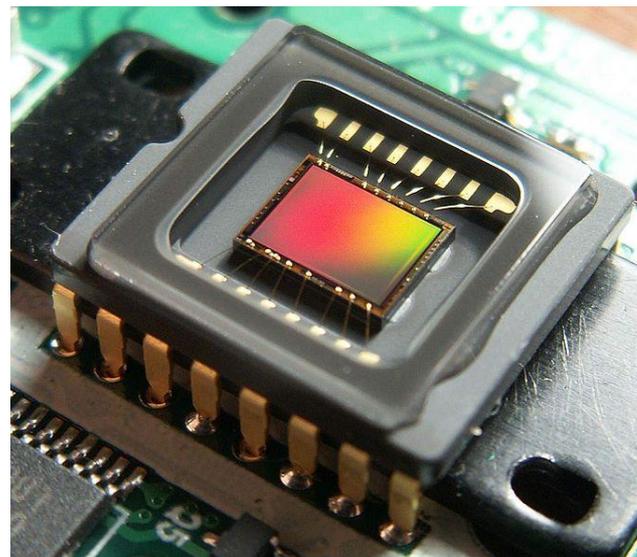
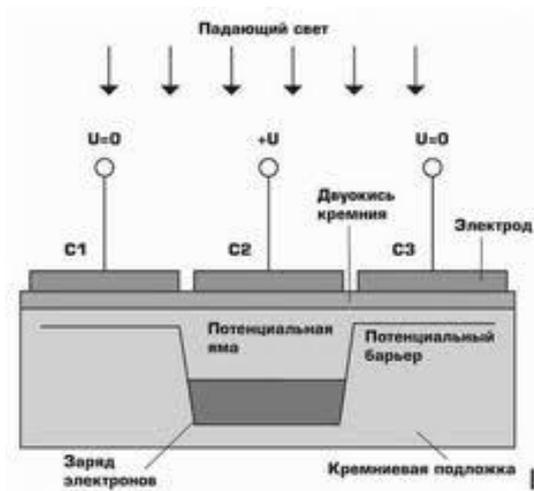


λ ,
МКМ

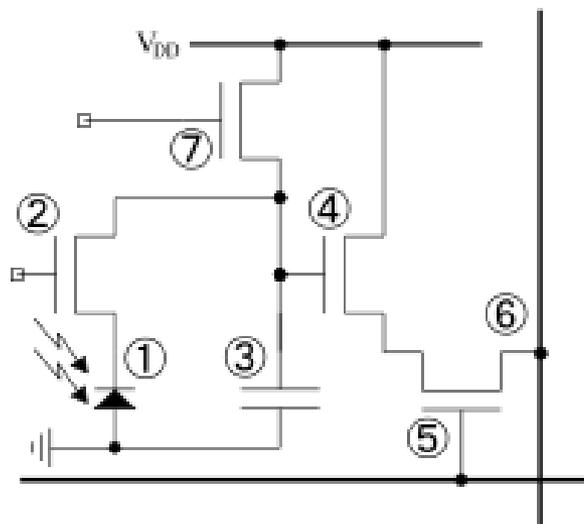
ПЗС и КМОП матрицы и линейки

Приборы с зарядовой связью

Схема ячейки ПЗС (CCD) матрицы



Сенсор видеокамеры.
Материал - кремний



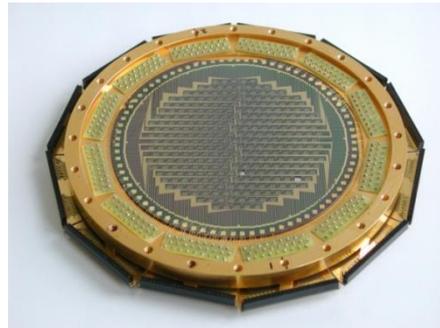
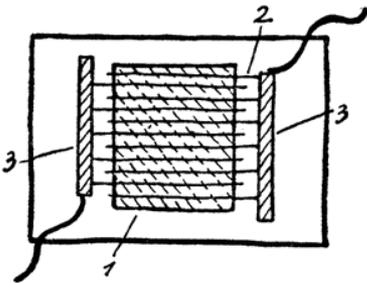
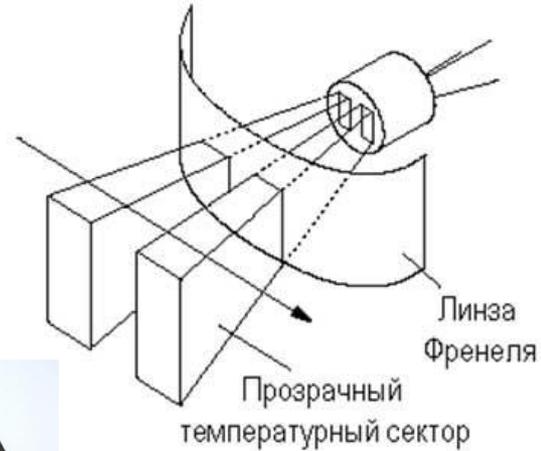
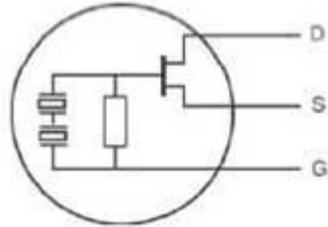
Комплицментарные металл-окисел-полупроводник

Схема ячейки КМОП (CMOS) матрицы

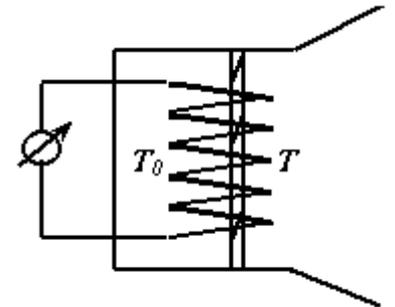
Пироприемник, фотосопротивление, болометр, видикон, термостолбик



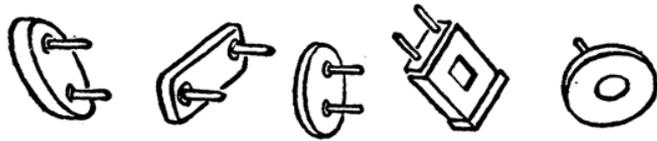
Пироприемник



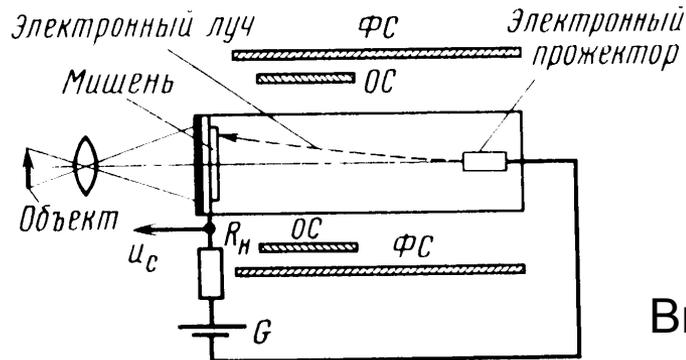
Матрица болометров



Термостолбик



Фотосопротивление



Видикон

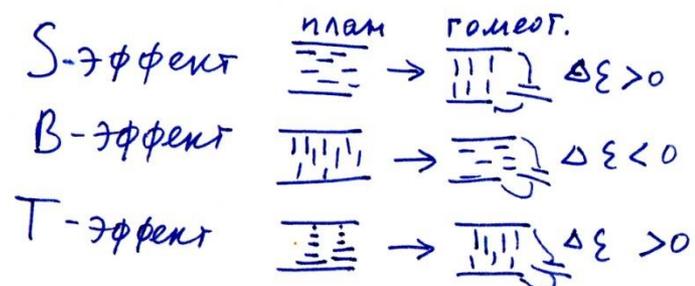
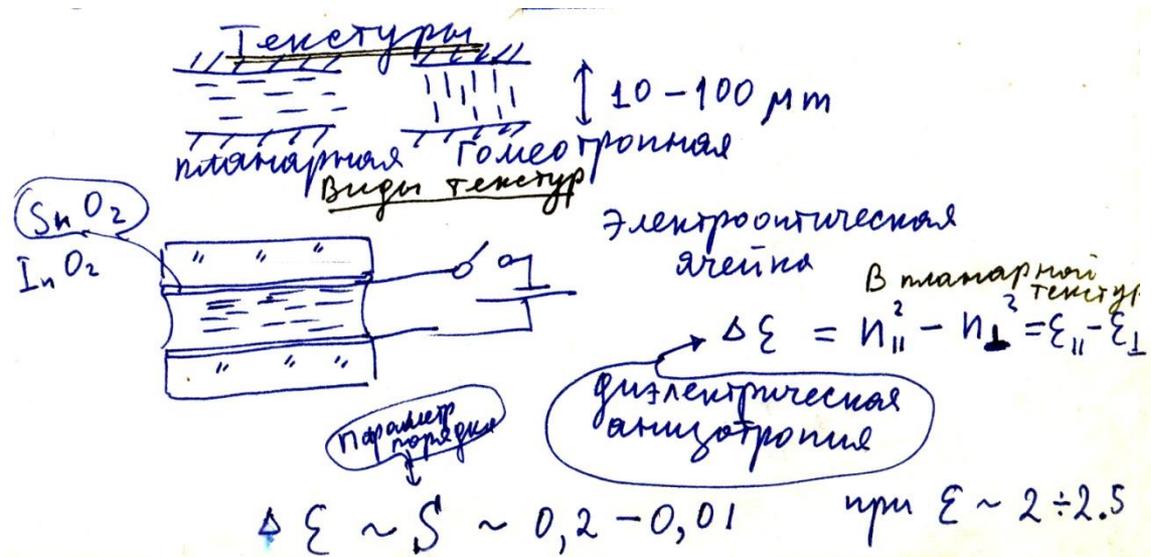
Модуляторы света

- Жидкостная ячейка Керра
- **Электро-оптическая** твердотельная ячейка с поперечным полем
- Электро-оптическая твердотельная ячейка с продольным полем (**ячейка Поккельса**)
- Электро-оптические микроэлектронные (**интегрально-оптические**) **модуляторы** на основе пленок $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$
- Магнито-оптическая **ячейка Фарадея** с вращением плоскости поляризации света веществом в магнитном поле
- **Механические модуляторы** (затворы, вращающиеся зеркала, призмы)
- Электронно-оптические модуляторы – **ЭОП –затворы, усилители яркости,**
- **Акусто-оптические ячейки** (дифракция Брэгга)
- **Жидкокристаллические затворы** (все ЖК-мониторы и телевизоры)

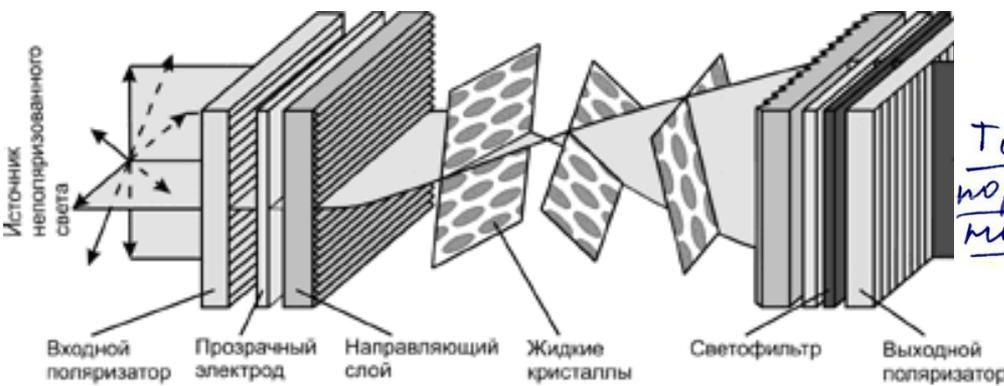
Источники модулированного излучения

- Полупроводниковые лазеры
- Лампы–вспышки и газоразрядные лампы с непрерывным модулируемым разрядом
- Электронно-лучевые трубки

Жидкокристаллические затворы (дисплеи)



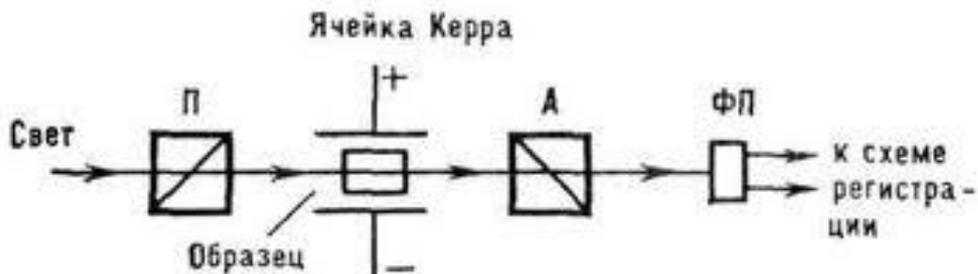
Свойства нематических жидких кристаллов



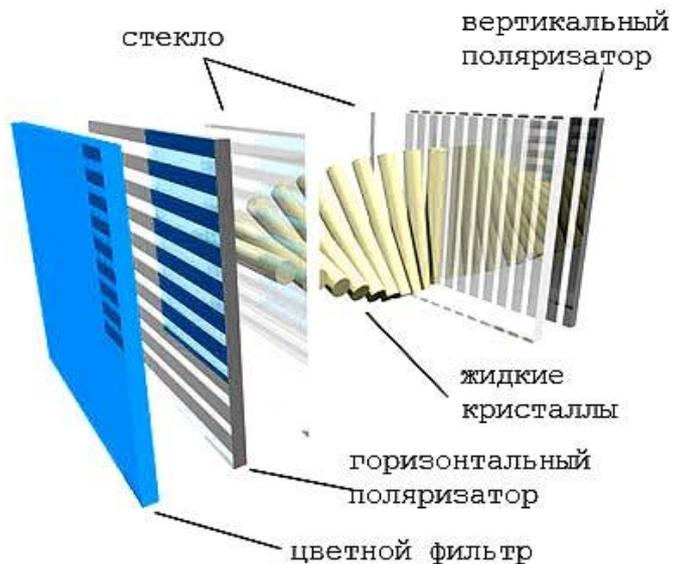
Поле выше, чем $E_c = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{4\pi K}{\Delta \epsilon}}$
 K - модуль упругости нематика
 L - толщина зазора ячейки.
 То есть $U_c = E_c L = \pi \sqrt{\frac{4\pi K}{\Delta \epsilon}}$ не зависит от ширины зазора L
пороговое напряжение

Переход Фредерикса
– задает порог переключения текстур

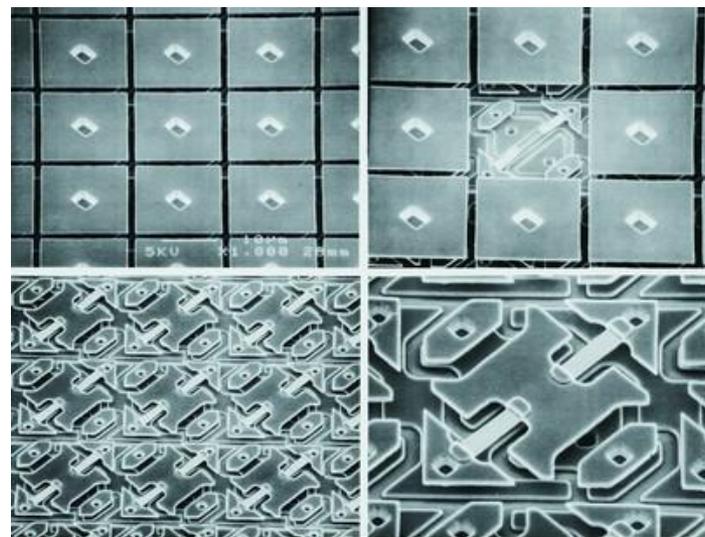
Модуляторы света



Электрооптические модуляторы $\sim 10^{-10}$ с

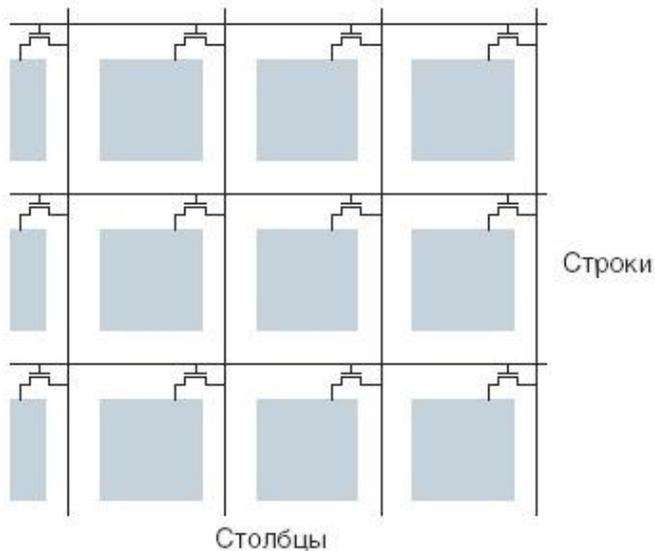


Активные матрицы на основе нематических ЖК $\sim 10^{-3}$ с



Массив управляемых зеркал

DLP-проекторы
 $10^{-5} - 10^{-6}$ с

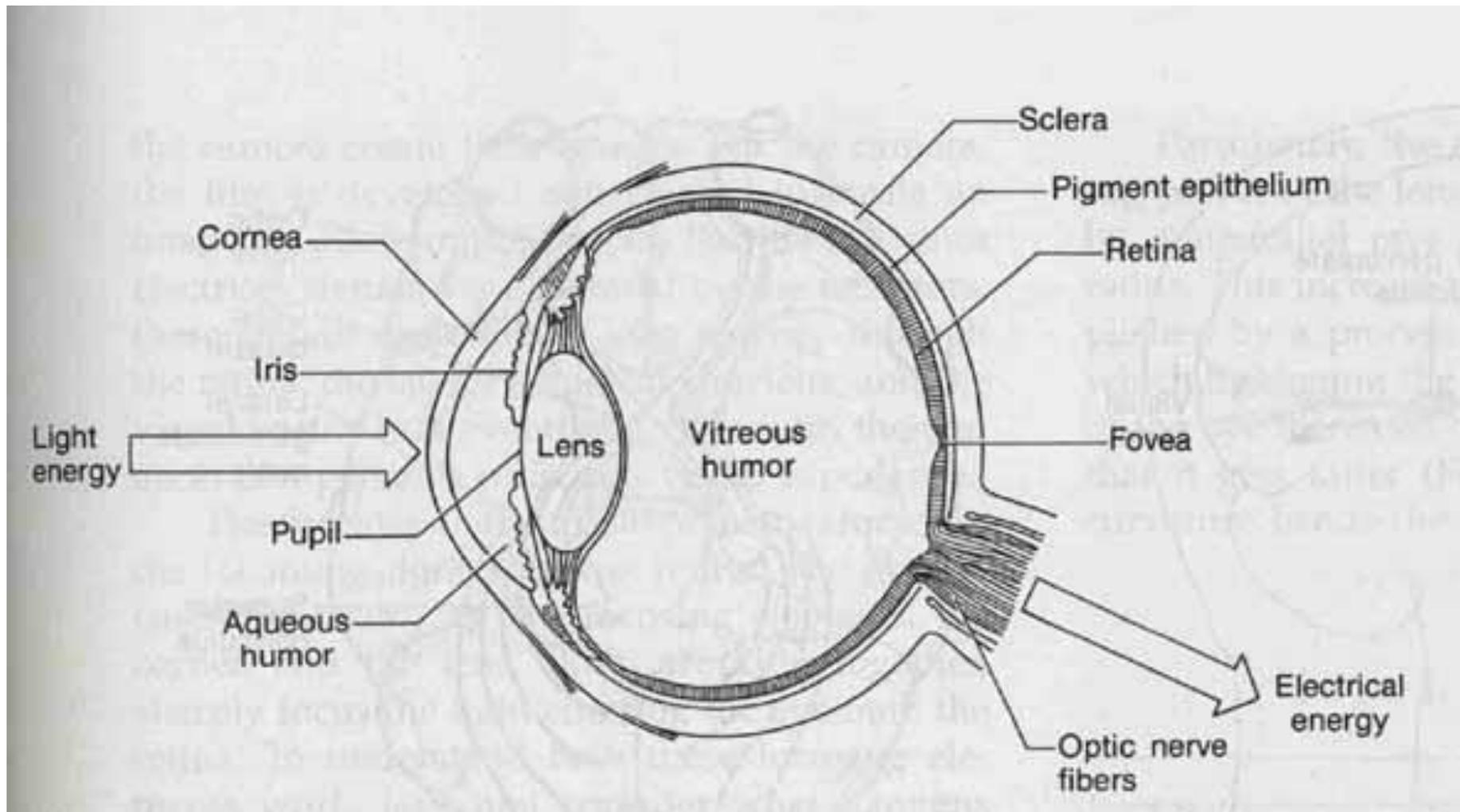


Дефлекторы

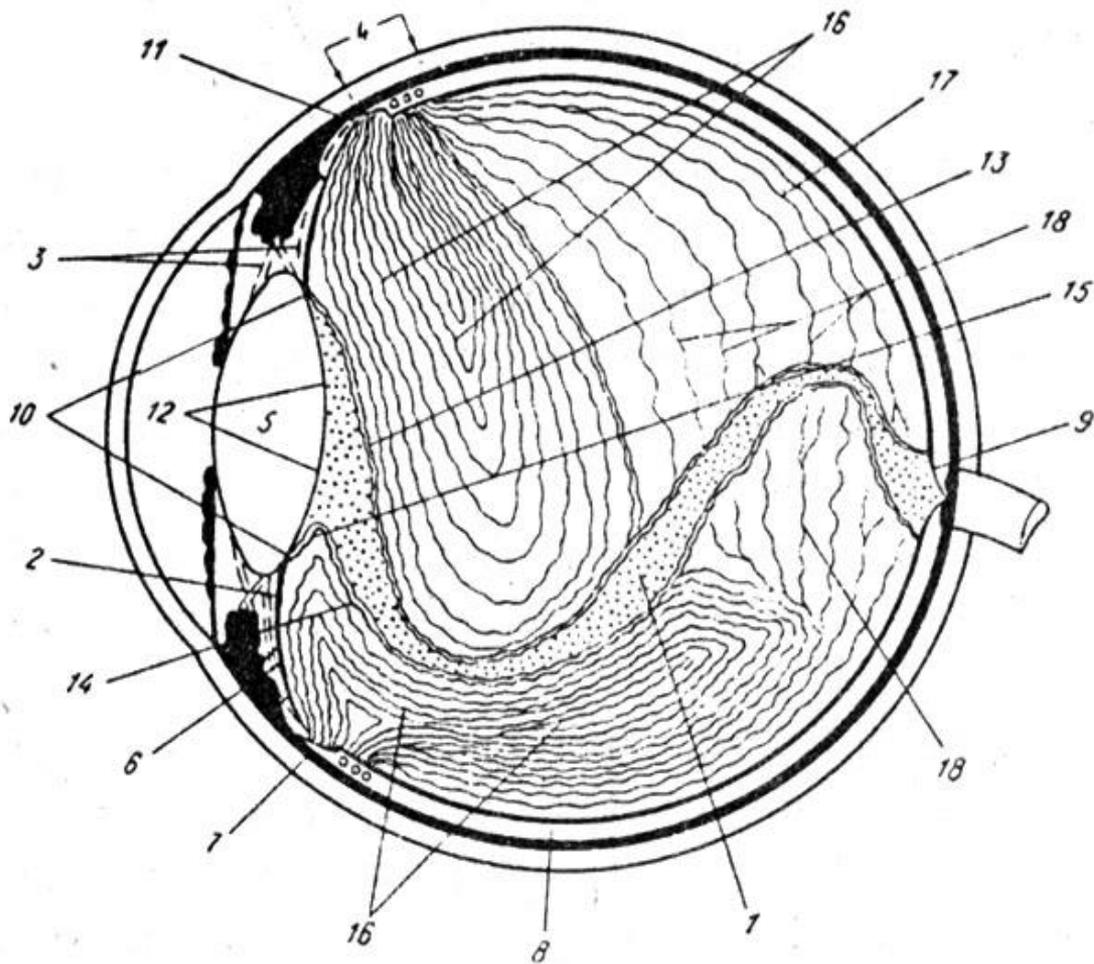
(отклоняющие и сканирующие устройства)

- Вращающиеся зеркала и призмы (скоростные камеры, лазерные принтеры, лазеры с модулированной добротностью)
- Гальванометрические дефлекторы, сканеры (лазерные шоу)
- Акусто-оптические дефлекторы – прецизионные лазерные фотопостроители (принтеры), проекционные дисплеи с 2D и 3D сканированием луча
- Голографические дефлекторы

Глаз человека. Схема.

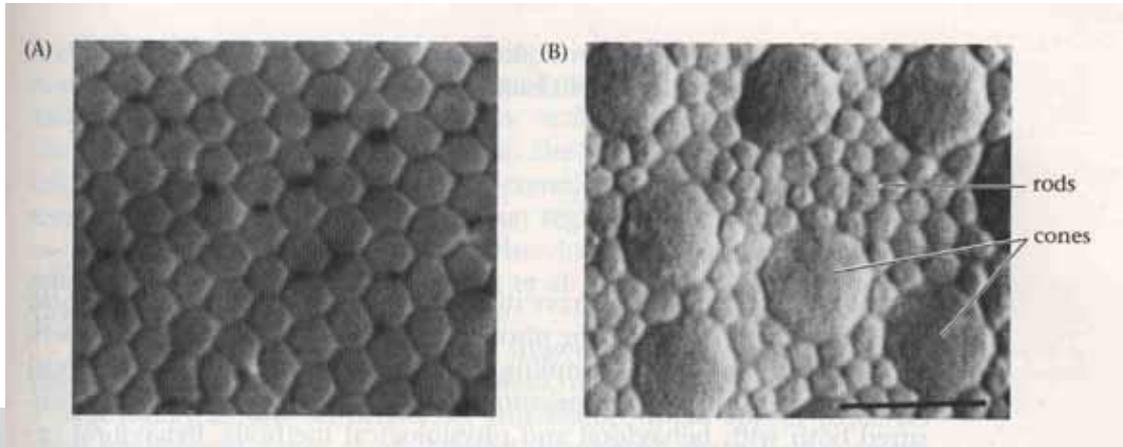


Пленчатые структуры стекловидного тела глаза

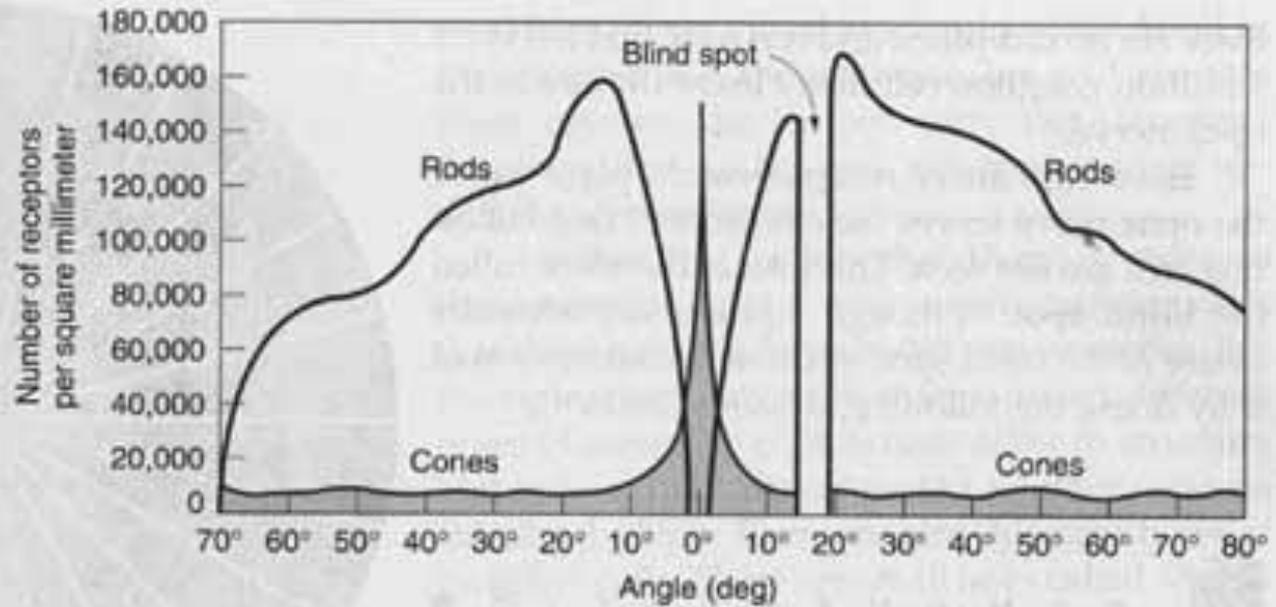
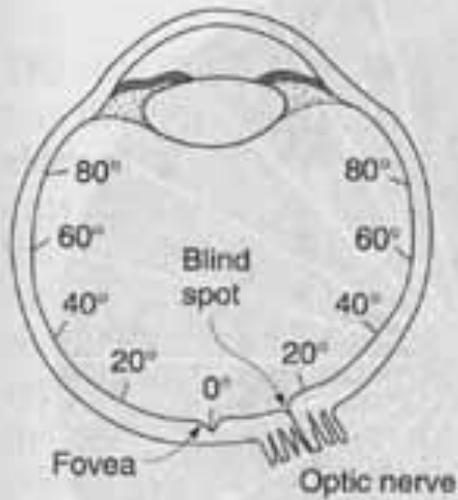


- 1— клокетов канал;
- 2— зонулярная (экстралентальная) часть передней гиалоидной мембраны;
- 3— зонулярные волокна;
- 4— переднее основание стекловидного тела;
- 5— хрусталик;
- 6— задняя камера;
- 7— преоральный цилиарный эпителий;
- 8— сетчатка;
- 9— диск зрительного нерва;
- 10— кольцевидная гиалоидно-капсулярная связка Вигера;
- 11— зонулярная щель;
- 12— ретролентальная часть передней гиалоидной мембраны;
- 13, 14— верхняя и нижняя стенки клокетова канала;
- 15— угол нижней складки клокетова канала;
- 16— передние фибриллы стекловидного тела;
- 17— фибриллы кортикальной зоны стекловидного тела («тракт» Ретциуса);
- 18— фибриллы «тракта» Ретциуса, примыкающие к клокетову каналу.

Человеческий глаз. Сетчатка



Распределение колбочек и палочек в фовеальной области (справа) и на периферии (слева).

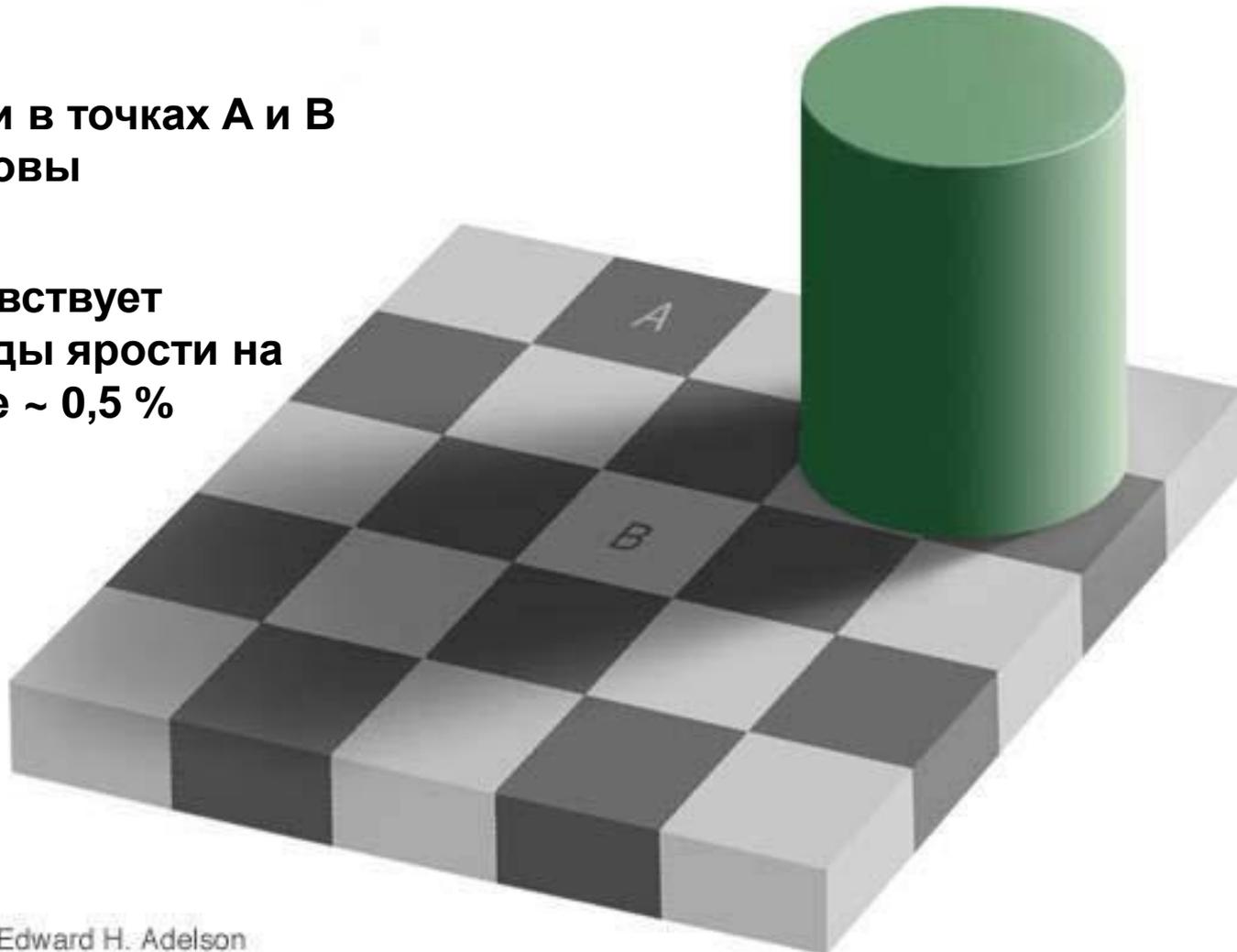


6 млн колбочек, 120 млн палочек, TV – 250000 элем., 1,6 млн нервных волокон

Глаз как фотометрический прибор

Яркости в точках А и В
одинаковы

Глаз чувствует
перепады яркости на
границе ~ 0,5 %



Edward H. Adelson

Эталон силы света - полный излучатель

- Эталон представляет собой модель абсолютно черного тела, порождающую при температуре затвердевания платины $2042,5^{\circ}\text{K}$ и давлении 101325 Па свет всех длин волн видимого спектра (равновесное Планковское излучение).
- Конструктивно это сосуд из окиси тория с платиной, засыпанной сверху и со всех сторон порошком из окиси тория. В платину погружена трубочка из окиси тория. Платина нагревается до плавления током высокой частоты.
- Так как сравнение источников света с эталоном происходит с помощью глаза, то усредненные характеристики глаза (в виде кривой видности) входят в эталонные измерения
- За единицу силы света принята условная величина - кандела, которая определяется силой света, испускаемой с площади $1/600000\text{ м}^2$ сечения полного излучателя в перпендикулярном этому сечению направлении (с 1 см^2 получается 60 кд)
- Согласованность полного излучателя около $\pm 0,6\%$ при внутрилабораторной погрешности $\pm 0,2\%$.

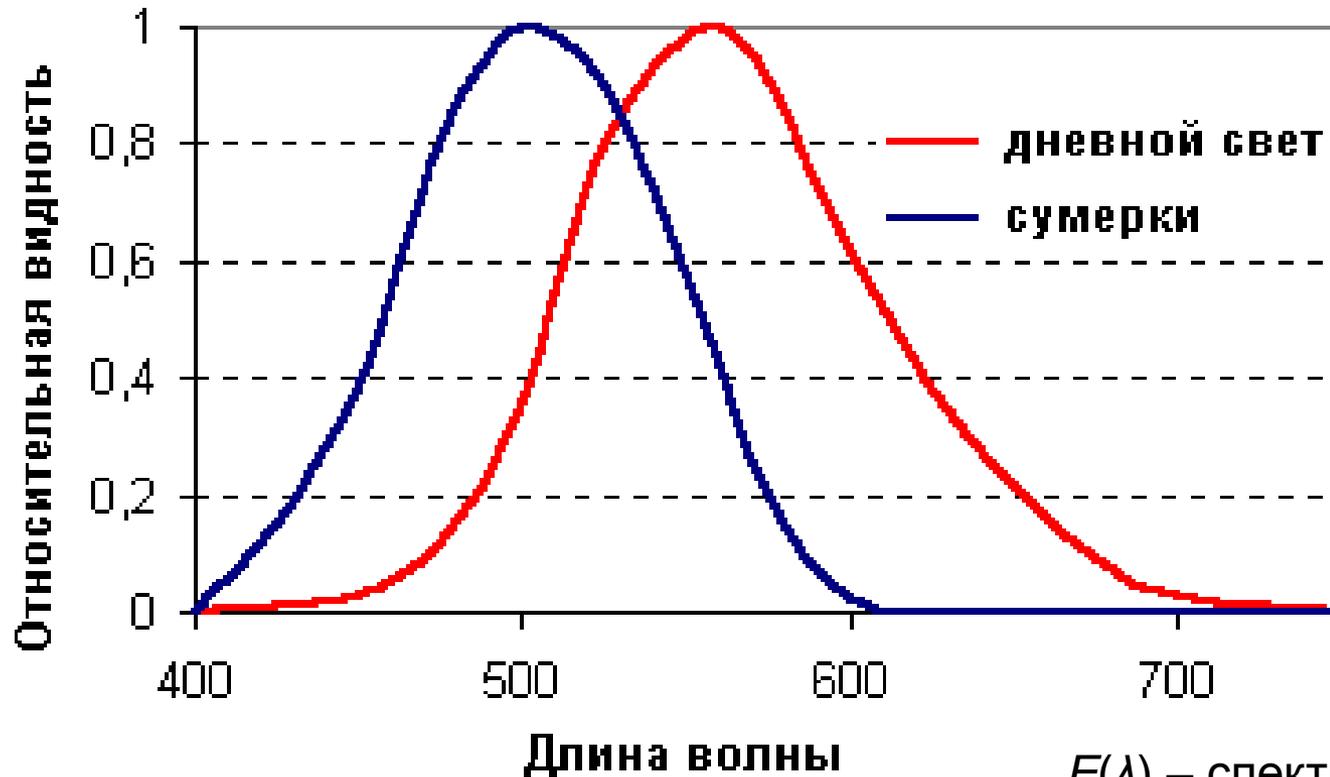
Сравнение эталонов силы света



- 1 — трубка из плавленной окиси тория ThO_2 ,
- 2 — тигель из плавленной ThO_2 с химически чистой платиной 3;
- 4 — кварцевый сосуд с засыпкой 5 из ThO_2 ;
- 6 — смотровое окно;
- 7 — призма полного внутреннего отражения;
- 8 — объектив, создающий изображение светящегося отверстия излучателя на диффузной белой пластинке 10; с другой стороны пластинка 10 освещается лампой сравнения 11;
- 9 — диафрагма.

Меняя расстояния между светомерной головкой, полным излучателем и лампой сравнения, добиваются уравнивания освещенностей на двух сторонах пластинки 10. Последнюю часто заменяют фотоэлементом, освещаемым попеременно первичным и вторичным световыми эталонами.

Кривая видности $v(\lambda)$ для глаза



$E(\lambda)$ — спектр источника света
 $\rho(\lambda)$ — спектр отражения объекта

Ощущение глаза :

$$E_0 = \int_{380}^{760} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda$$

Максимальная чувствительность глаза

- при дневном свете — **555 нм**
- при сумеречном свете — **507 нм**

Основные фотометрические величины

Величина	Обозначение	Связь с другими величинами	Единица	
			Наименование	Обозначение
Световой поток	Φ_v		люмен	ЛМ
Световая энергия	Q	$Q = \int \Phi_v dt$	люмен-секунда	ЛМ·с
Световая эффективность излучения	K	$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e}$	люмен на ватт	ЛМ·Вт ⁻¹
Сила света (источника в некотором направлении)	I	$I = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	кандела	кД
Яркость (в заданной точке и в заданном направлении)	L	$L = \frac{d^2\Phi_v}{dA \cos \theta d\Omega}$	кандела на кв. метр (устаревшее название нит)	кД·м ⁻²
Освещённость (в точке поверхности)	E	$E = \frac{d\Phi_v}{dA}$	люкс	лк
Светимость (в точке поверхности)	M	$M = \frac{d\Phi_v}{dA}$	люмен на кв. метр	ЛМ·м ⁻²
Экспозиция (световая экспозиция)	H	$H = \frac{dQ}{dA} = \int E dt$	люкс-секунда	лк·с
Освечивание	Θ	$\Theta = \int I dt$	кандела-секунда	кД·с
Спектральная плотность световой величины	X_λ	$X_\lambda = \frac{dX}{d\lambda}$		

Энергетические фотометрические величины

Переход между основными и энергетическими единицами

При дневном свете
для $\lambda = 555$ нм
 $1 \text{ Вт} \Leftrightarrow 683 \text{ лм}$

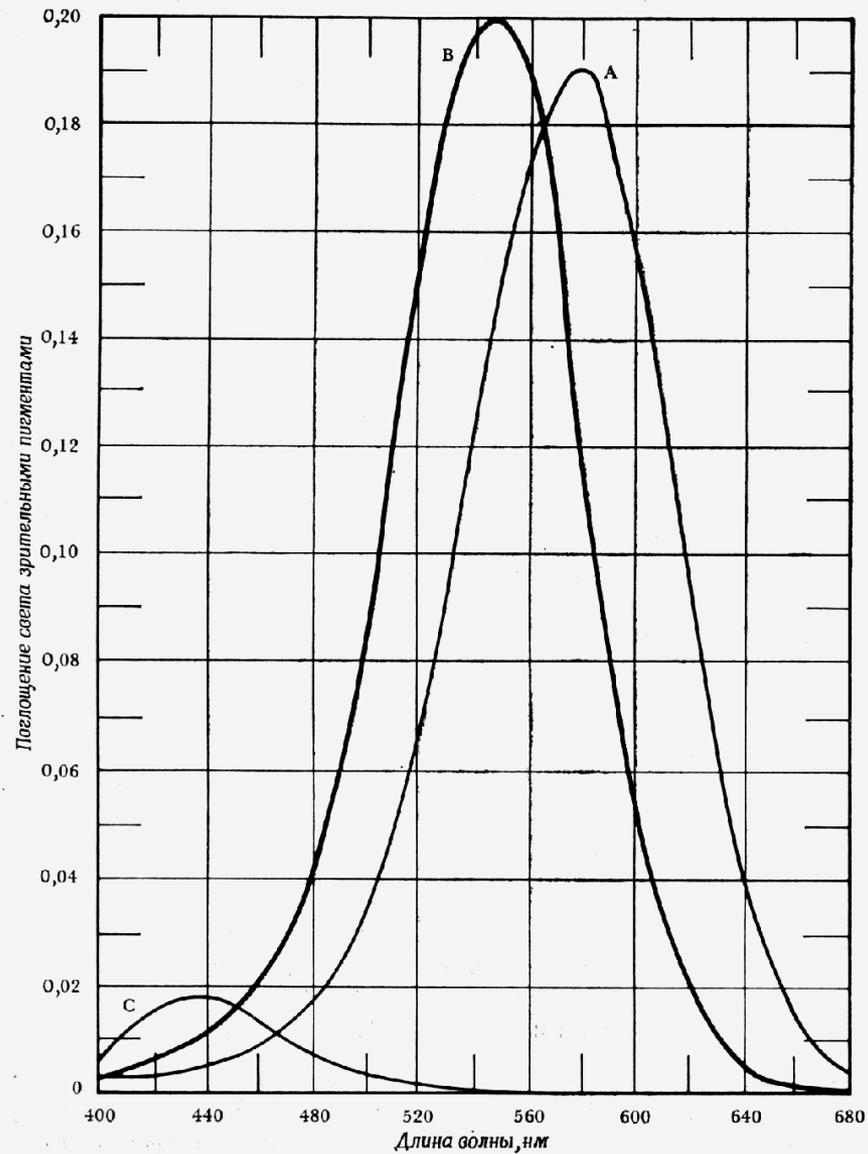
При сумеречном свете
для $\lambda = 507$ нм
 $1 \text{ Вт} \Leftrightarrow 1745 \text{ лм}$

Бугер 1729 г.
Кеплер 1604 г.

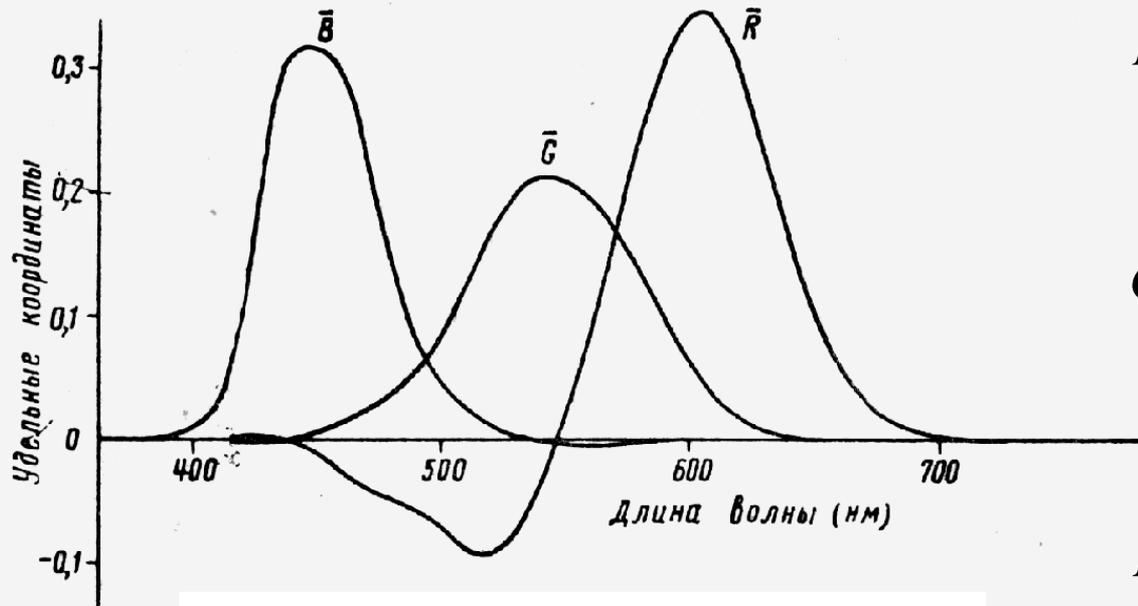
$$E = I / r^2$$

Энергетич. фотометрич. величины (в скобках синонимы и пояснения)	Единицы
Энергия излучения (лучистая энергия)	Дж
Поток излучения (лучистый поток)	Вт
Сила излучения (энергетич. сила света)	$\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$
Энергетич. яркость	$\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$
Энергетич. освещённость (облучённость)	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$
Энергетич. светимость (излучательность)	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$
Энергетич. экспозиция	$\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2}$
Энергетич. освечивание (интеграл от энергетич. силы света по времени в пределах рассматриваемого интервала времени)	$\text{Дж} \cdot \text{ср}^{-1}$
Спектр. плотность энергетич. фотометрич. величины (производная этой величины по длине волны или др. спектр. координате)	

Спектры поглощения пигментов колбочек



ЦКС МКО RGB



Кривые сложения ЦКС МКО RGB

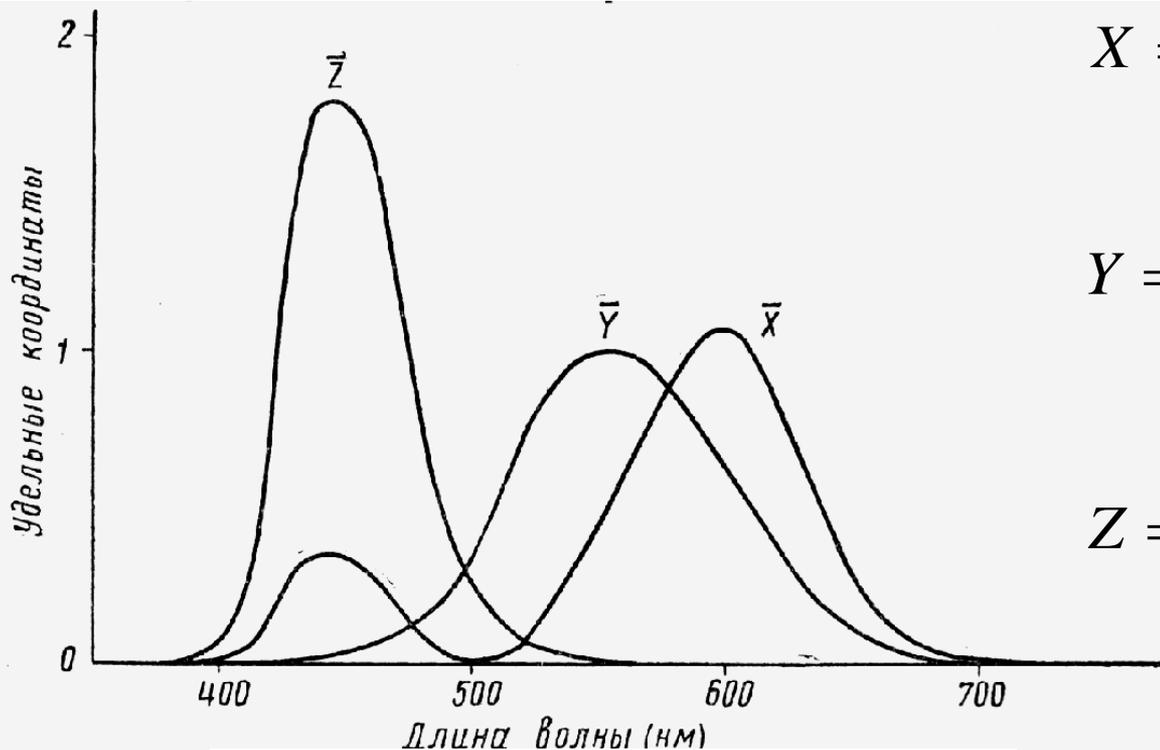
$$R = \int_{380}^{760} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot r(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$G = \int_{380}^{760} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot g(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$B = \int_{380}^{760} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot b(\lambda) \cdot d\lambda$$

Кривые сложения r, g, b (красный, синий, голубой), полученные экспериментальным путем для цветовой системы с основными цветами, соответствующими монохроматическим излучениям с длинами волн 700; 546,1 и 435,8 нм

ЦКС МКО XYZ



Кривые сложения ЦКС МКО XYZ

$$X = \int_{380}^{760} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot x(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{760} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot y(\lambda) \cdot d\lambda$$

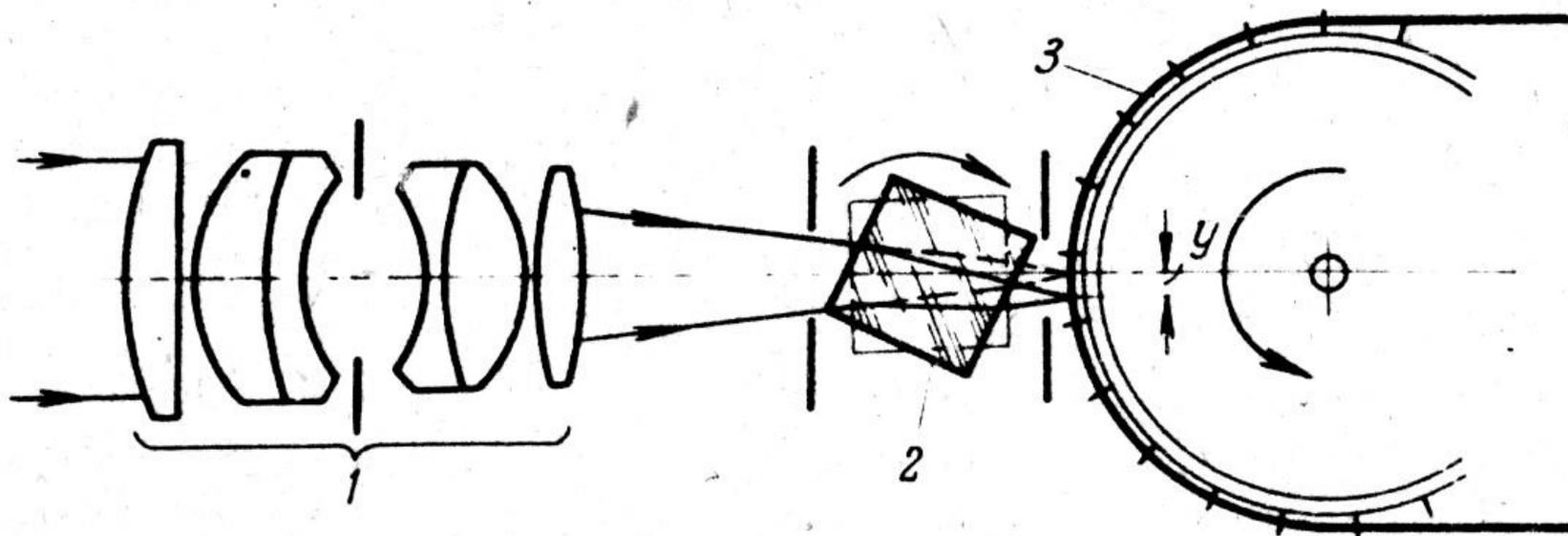
$$Z = \int_{380}^{760} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot z(\lambda) \cdot d\lambda$$

Кривые сложения x, y, z.

y соответствует кривой видности глаза и является координатой яркости

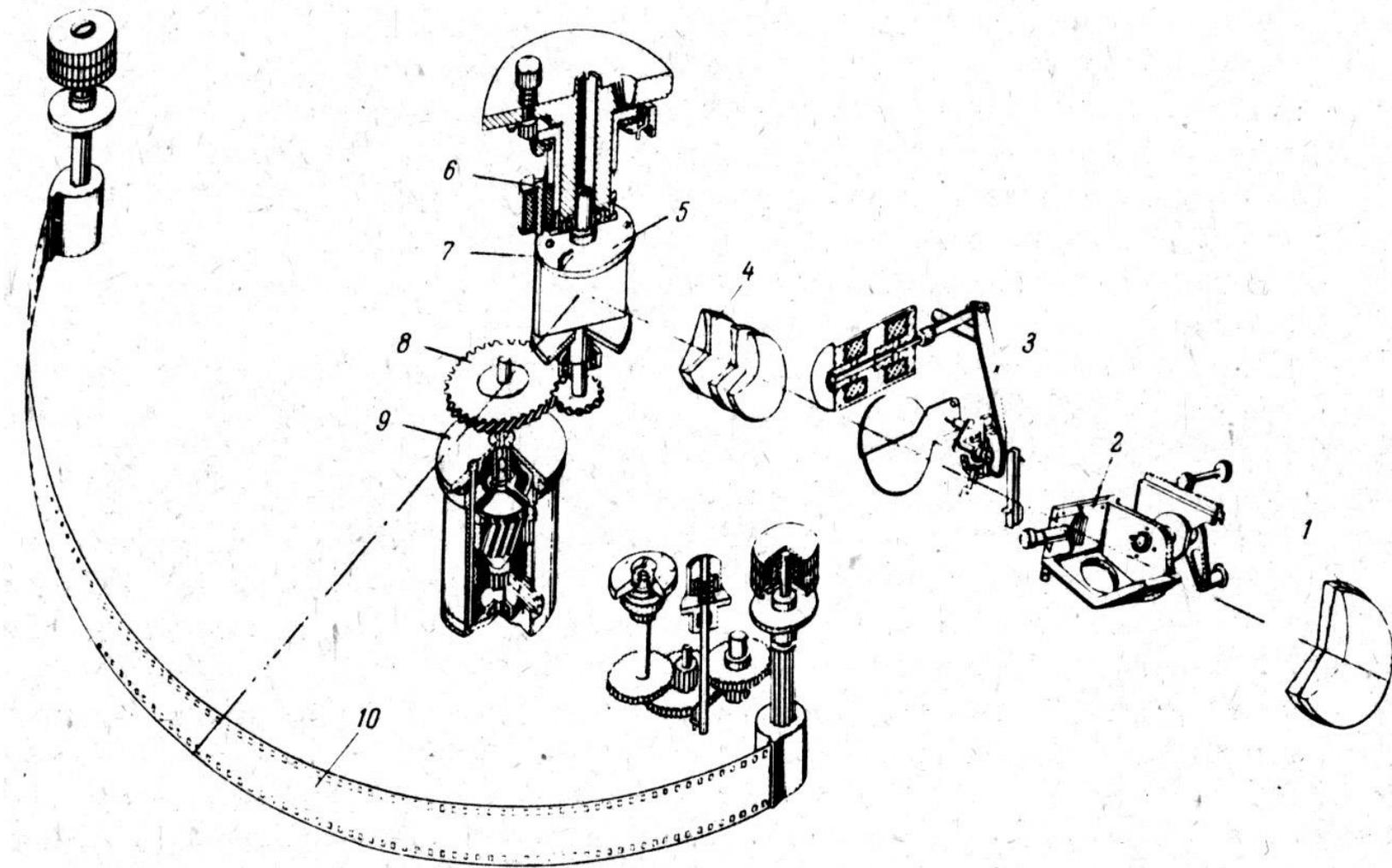
x содержит информацию о цвете объекта, т.к. координата Z получается из уравнения $X+Y+Z=1$

Камера с движущейся пленкой – СКС-1



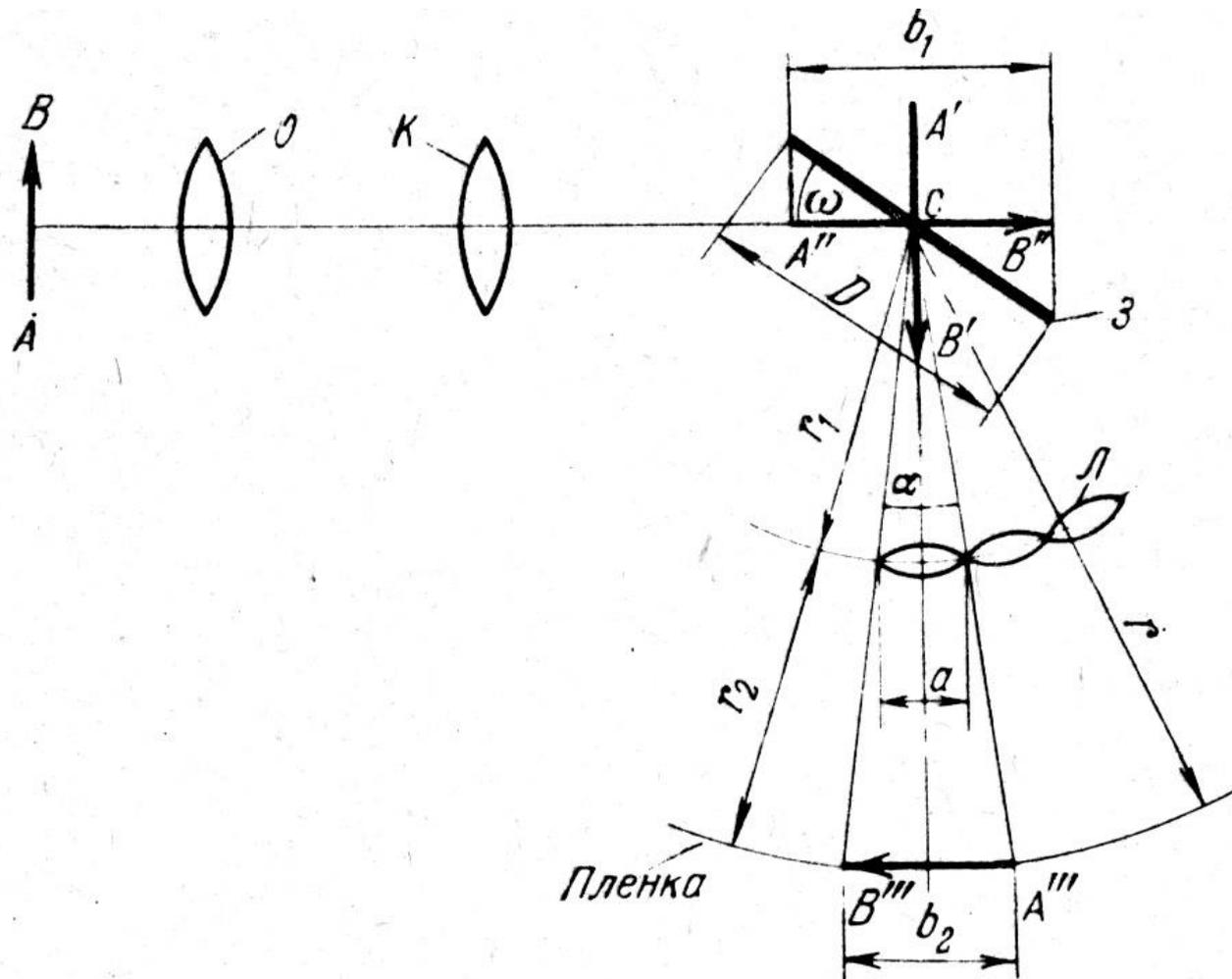
Принципиальная схема аппарата с призмным компенсатором движения фотопленки.

Камера-хронограф с неподвижной пленкой и вращающимся зеркалом



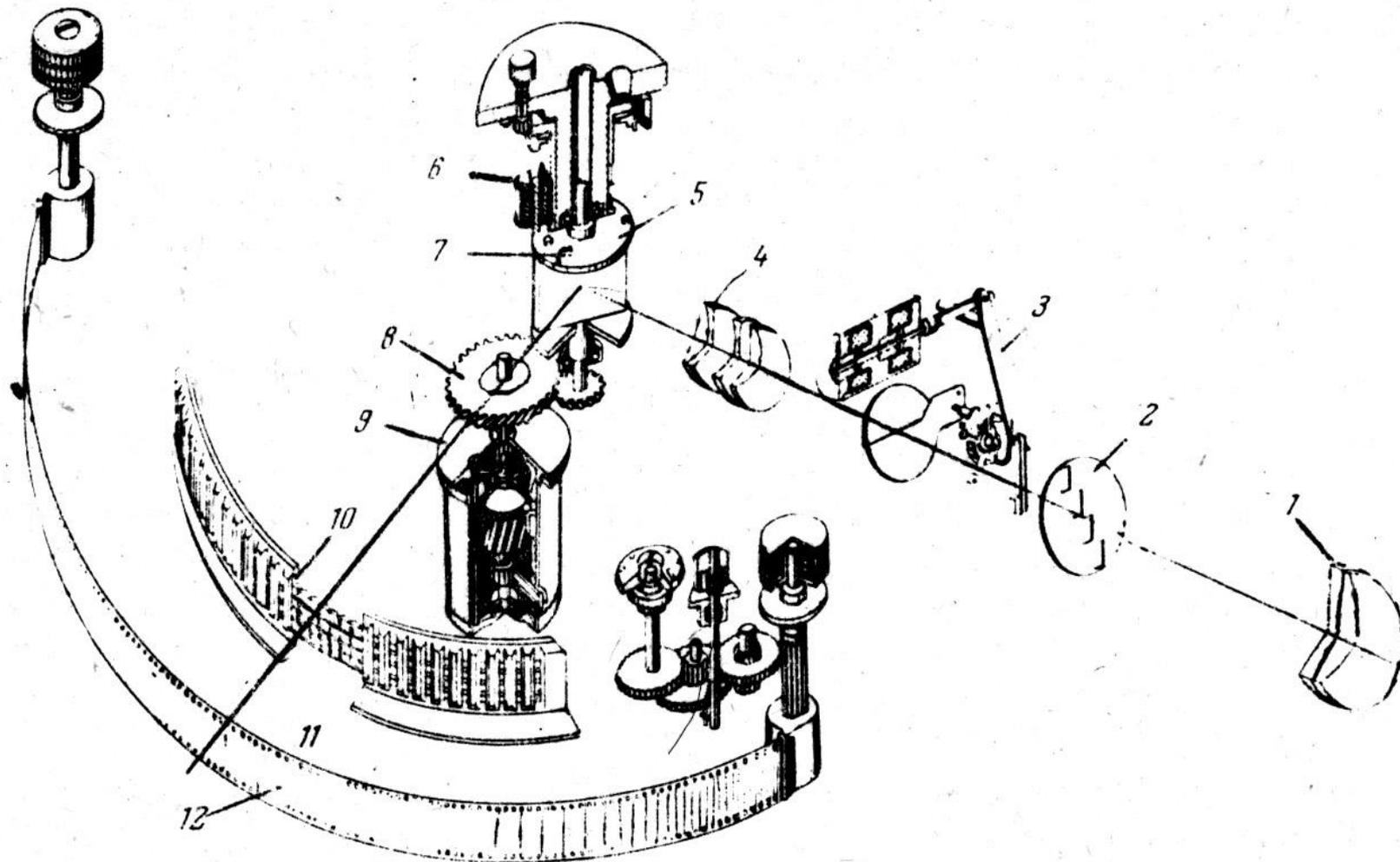
Принципиальная схема установки (ВФУ).

Камера с неподвижной пленкой, вращающимся зеркалом и линзовым растром



Геометрические параметры фотокамеры с оптико-механической коммутацией изображения.

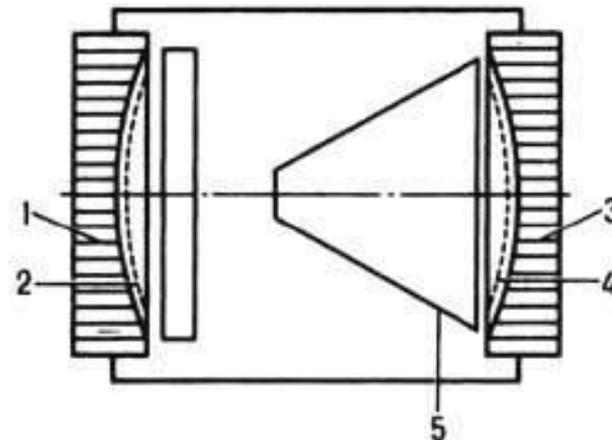
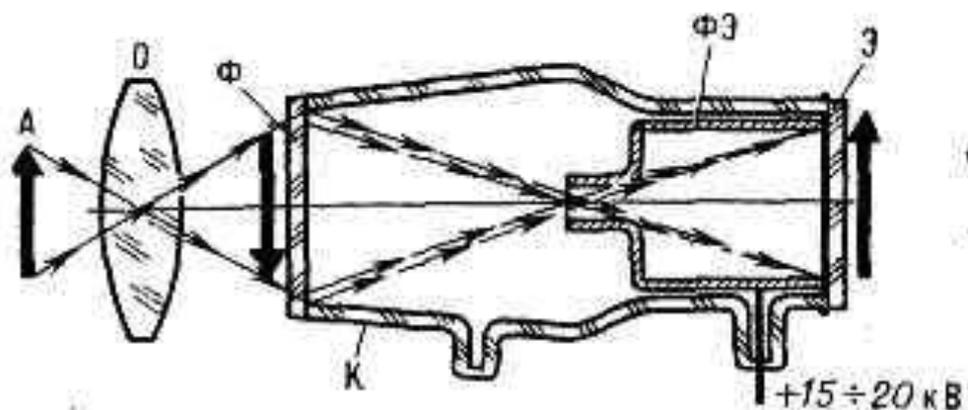
Камера с неподвижной пленкой, вращающимся зеркалом и линзовым растром



Принципиальная схема высокоскоростной фотокамеры ВФУ (СФР).

Электронно-оптические преобразователи

1-е поколение



Ф – фотокатод, ФЭ – фокусирующий электрод, Э – экран, К – вакуумная колба

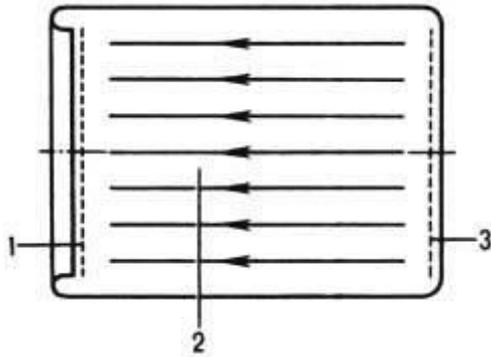
1 – входная волоконно-оптическая пластина (ВОП); 2 – фотокатод; 3 – выходная ВОП; 4 – экран; 5 – анод .



Разновидности электронно-оптических преобразователей



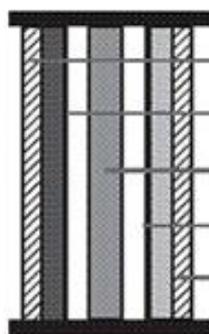
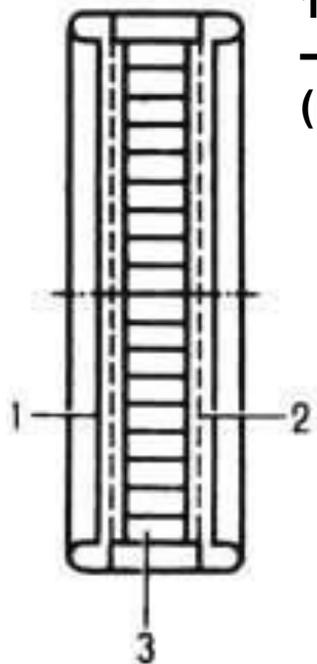
Каскадный ЭОП $K_{yc} \sim 100-300$ на каскад



Бипланарный ЭОП с плоским электрическим полем
1 – экран (анод); 2 – электрическое поле; 3 – фотокатод

ЭОПы 2-го и 3-го поколения

1 – фотокатод, 2 – люминофор, 3 – микроканальная пластина (МКП)



Стекло
Стекло
Фотокатод
МКП
Люминофор (экран)

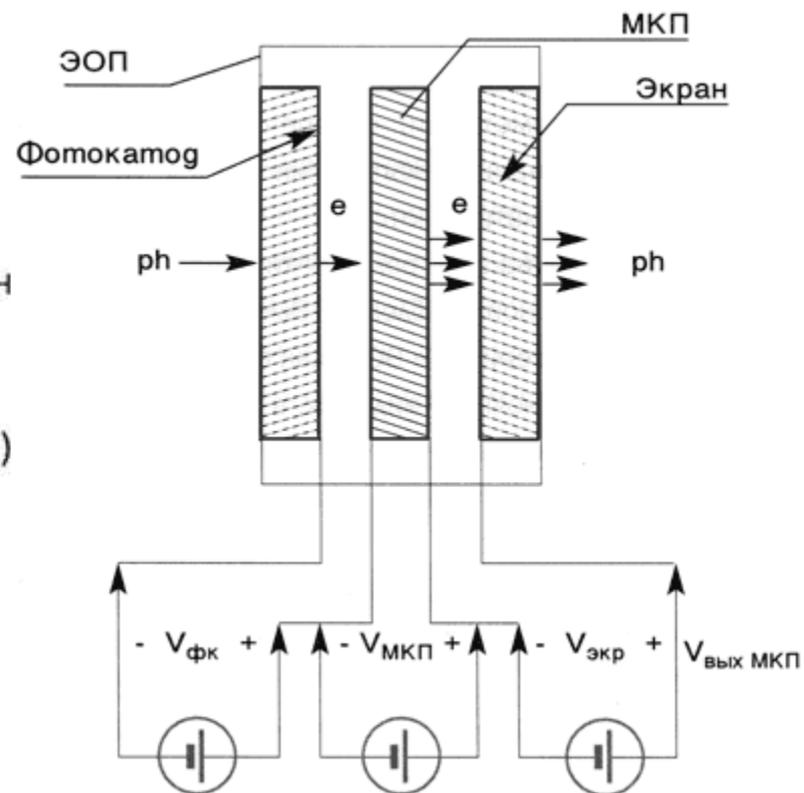


Схема питания ЭОП с МКП

ЭОП с МКП производства
ЗАО «Экран – оптические системы»
г. Новосибирск

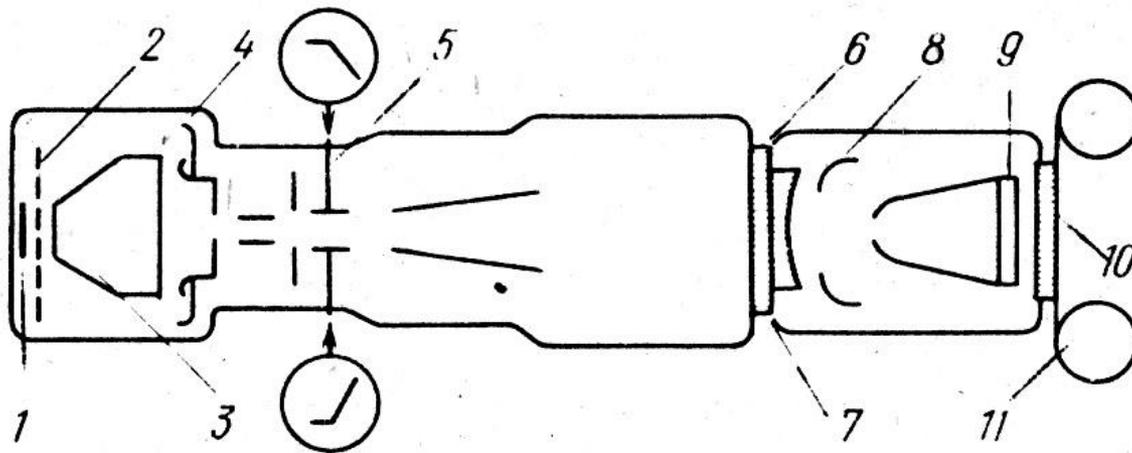
ЭОПы 4-го и 5-го поколений

ИФП СО РАН



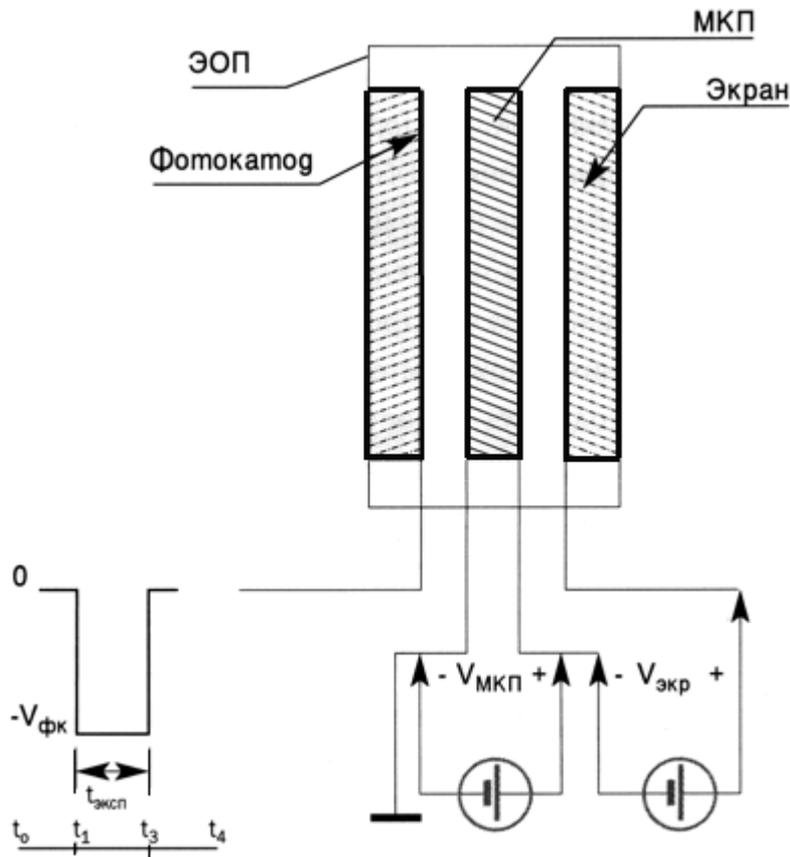
Электронно-оптические преобразователи 4-го и 5-го поколений на основе широкополосного (по спектру) GaAs-фотокатода, микроструктурированного экрана и электронно-чувствительной матрицы на приборах зарядового сдвига

Камера на базе ЭОП со сканированием и с МКП-усилителем



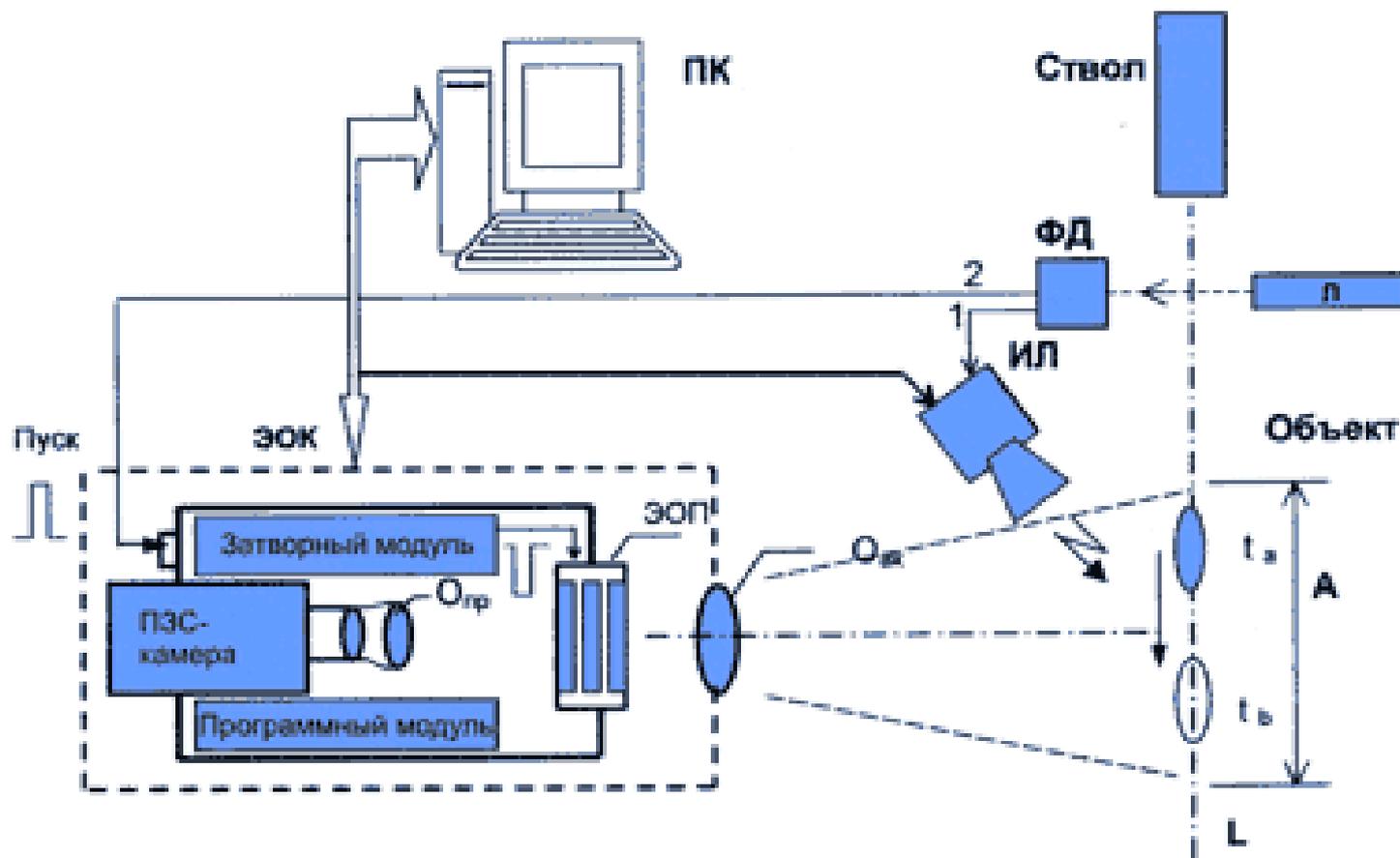
Принципиальная схема электронно-оптической камеры Имакон-675 I с микроканальным усилителем [194]: 1 – фотокатод, 2 – сетка, 3 – фокусирующая система, 4 – анод, 5 – отклоняющие пластины, 6 – 75-мм микроволоконное выходное окно, 7 – 50-мм микроволоконное входное окно, 8 – фокусирующий конус, 9 – микроканальная пластина, 10 – 40-мм микроволоконное выходное окно, 11 – фотослой.

Оптический затвор-усилитель на ЭОП с МКП с усилением в 30000 раз



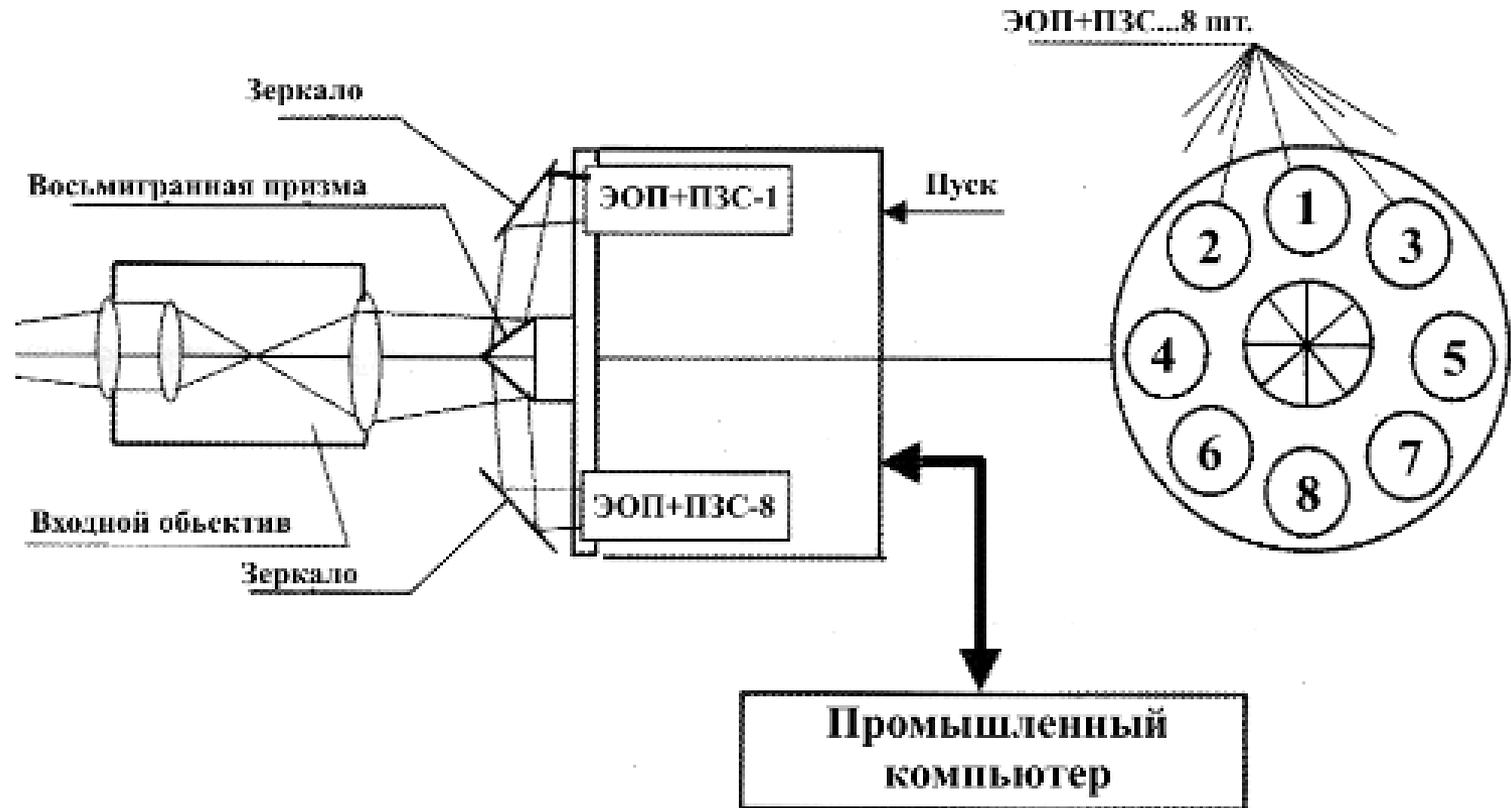
Импульсное управление ЭОП поколения II и III

Скоростная камера на основе ЭОП



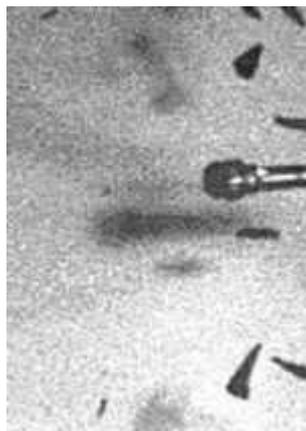
Структурная схема одноканальной программно-управляемой электронно-оптической камеры в составе испытательного комплекса.

Многокадровая скоростная камера на ЭОП

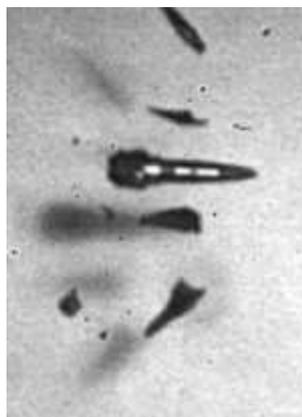


Моноблочная программируемая многокадровая электронно-оптическая камера (ЭОК)

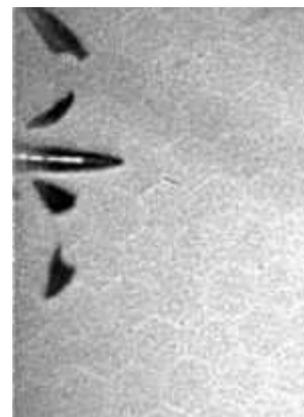
Примеры снимков



$t_1 = 0$
 $t_{\text{эксп}} = 50 \text{ нс}$



$t_2 = 200 \text{ мкс}$
 $t_{\text{эксп}} = 200 \text{ нс}$

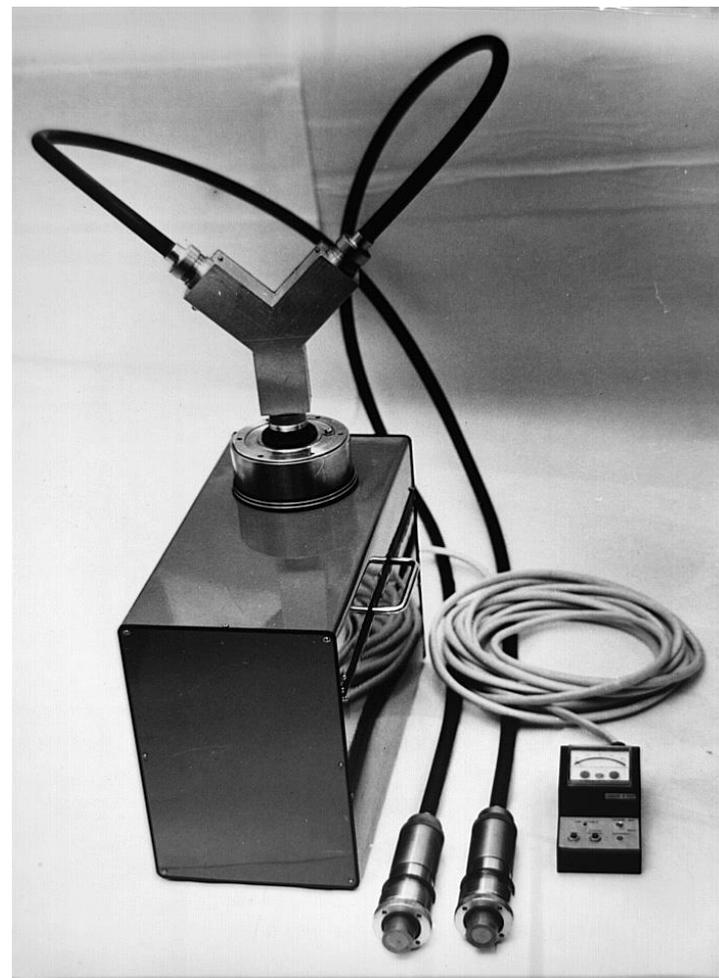
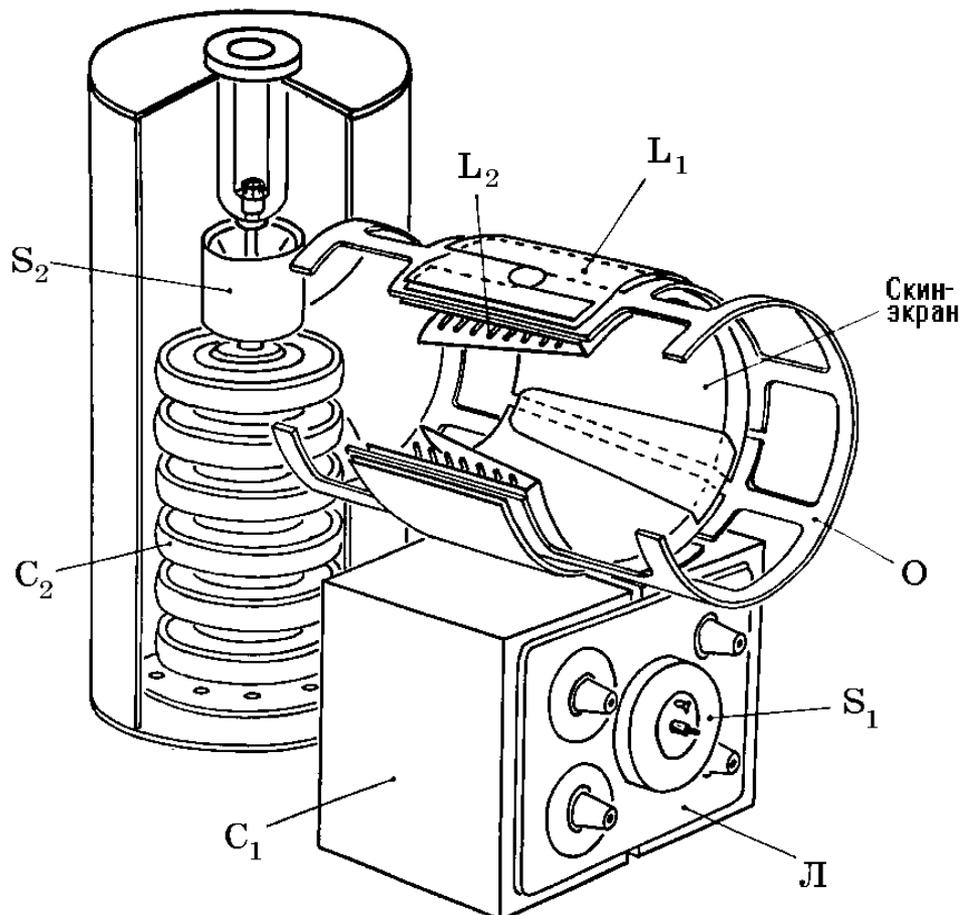


$t_3 = 320 \text{ мкс}$
 $t_{\text{эксп}} = 300 \text{ нс}$

Серия из трех кадров, зарегистрированных комплексом NANOGATE – 4 (вариант камеры с четырьмя ЭОП)



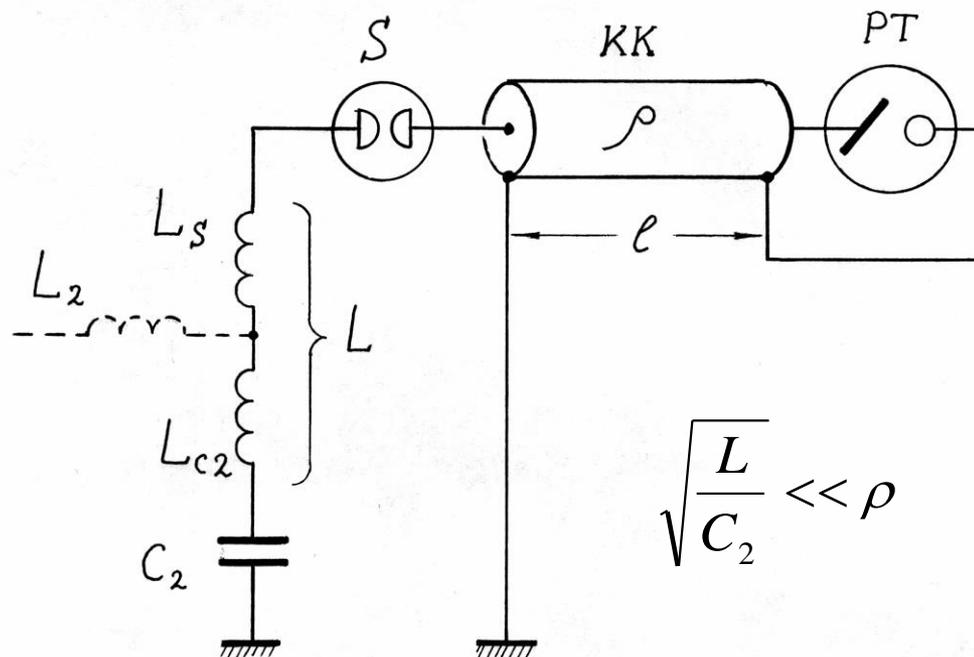
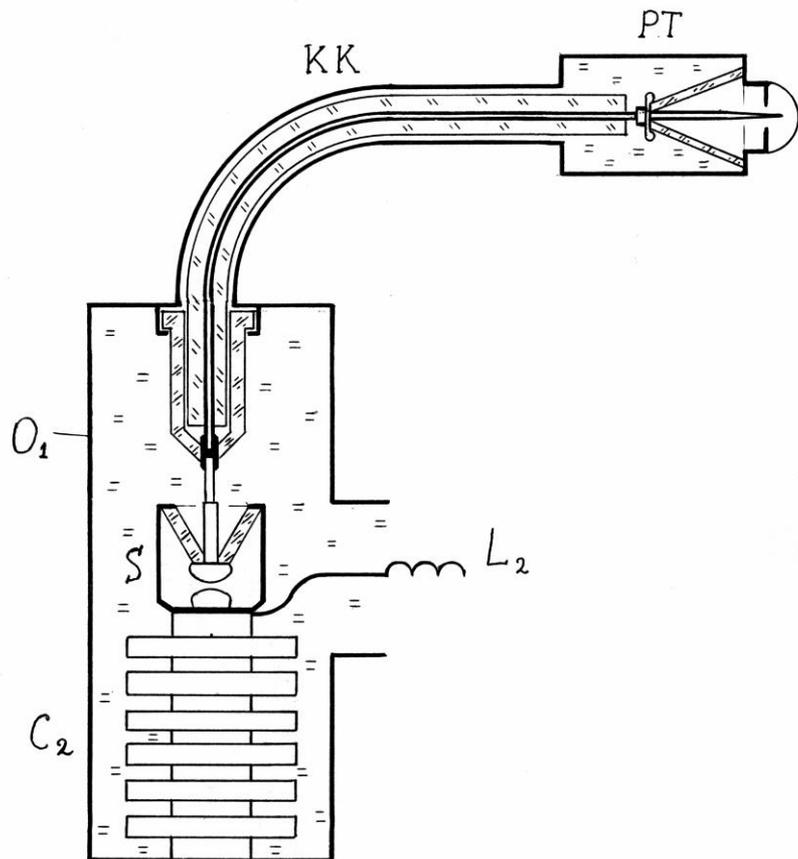
Импульсный рентгеновский аппарат на трансформаторе Тесла и рентгеновской трубке с взрывной эмиссией электронов



Аппарат ПИР-100/240 с рабочими напряжениями 100/150/240 кВ и двумя выносными рентгеновскими трубками для стереосъемки

Компоновка разрядной цепи аппарата ПИР-100/240

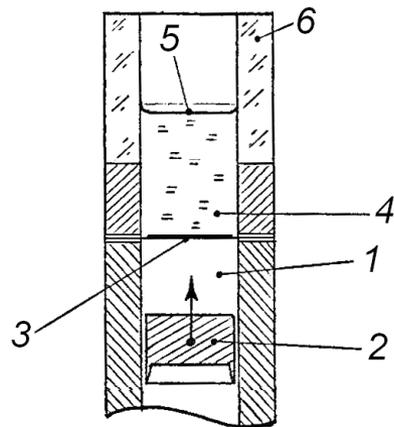
Неоднородная разрядная цепь с отдельным срабатыванием разрядника-обострителя и рентгеновской трубки. Обладает свойствами двойной формирующей линии.



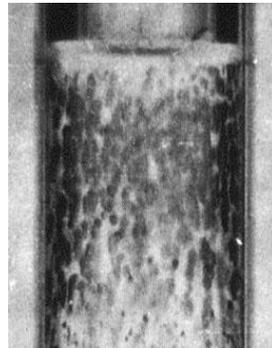
Эквивалентная схема

C_2 - керамическая ударная ёмкость; S - водородный разрядник-обостритель высокого давления; KK - коаксиальный кабель с волновым сопротивлением ρ и длиной l ; PT - рентгеновская трубка; O_1 - коаксиальный проводящий кожух батареи C_2 ; L_2 - индуктивность вторичного контура. L_{C2} - паразитная индуктивность ёмкости C_2 ; L_S - паразитная индуктивность разрядника S .

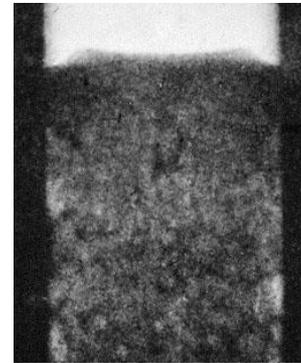
Съемка кавитационного разрушения воды в волне разгрузки. Рентгеновский аппарат ПИР-240.



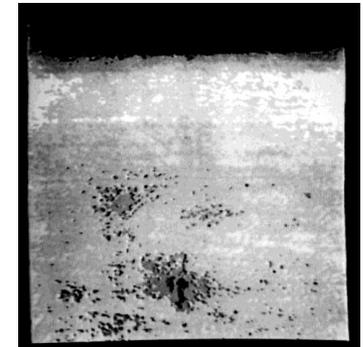
а



б



в



г

(а) – схема гидродинамической ударной трубы: поршень 2 ускоряется сжатым воздухом в вакуумном канале 1 и ударяется о мембрану 3. Волна сжатия в воде 4 отражается от свободной поверхности 5 превращаясь в волну разгрузки.

(б) – оптическая картина разрушения через $200 \mu\text{s}$ после отражения от поверхности воды волны с фронтом $< 2 \mu\text{s}$, длительностью $60 \mu\text{s}$ и амплитудой 250 Бар.

(в) – синхронный рентгеновский теневой снимок.

(г) – синхронный томографический разрез вдоль оси трубы, полученный методом обратной проекции

Эксперимент моделирует отражение УВ при подводном взрыве.

Томографическая рентгеновская съемка кавитационного разрушения воды в волне разгрузки

Сечения, восстанавливаемые методом обратной проекции

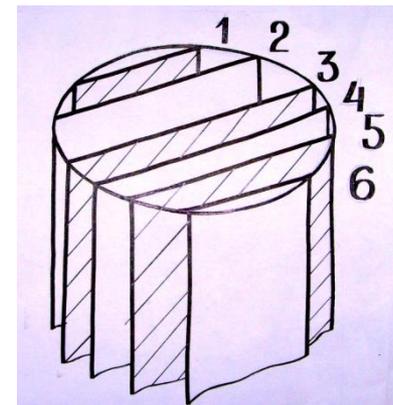
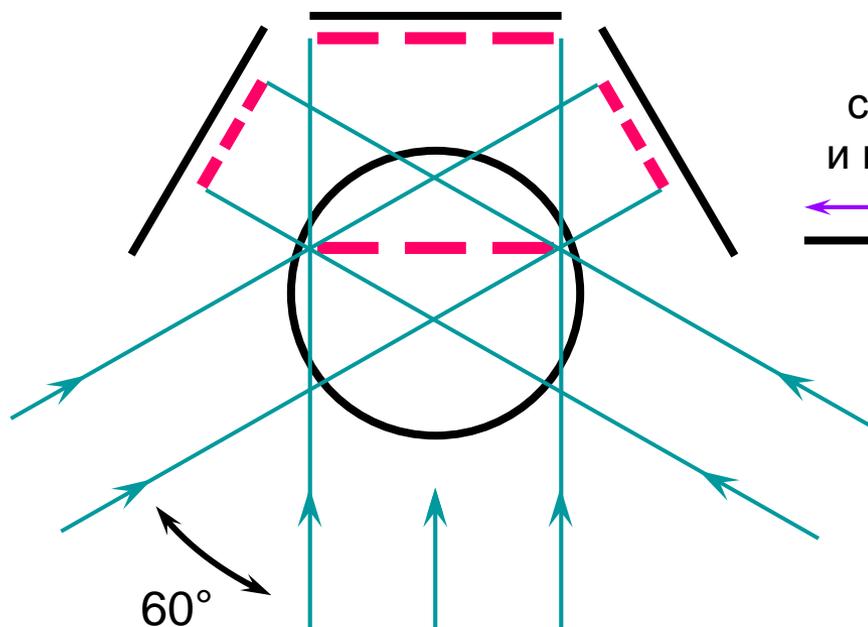
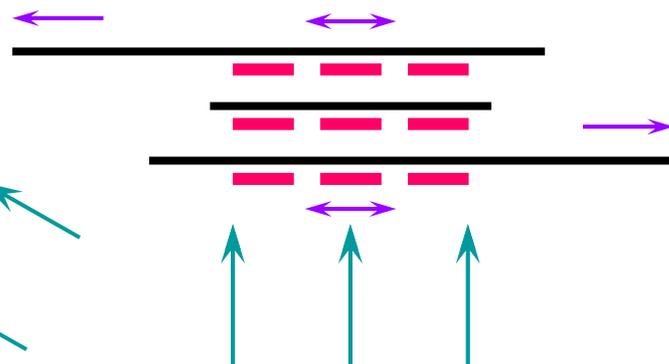


Схема синхронной импульсной рентгеновской съемки процесса кавитации в ударной трубе

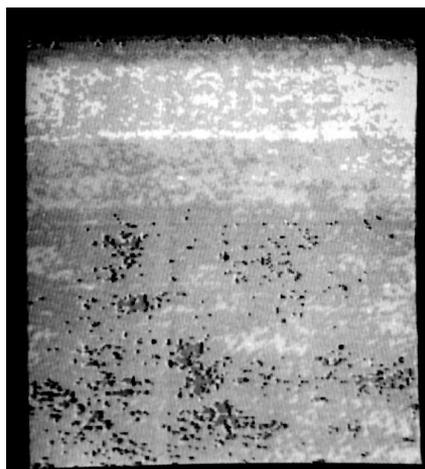
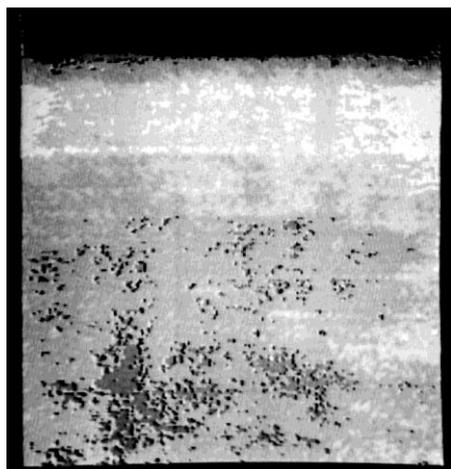
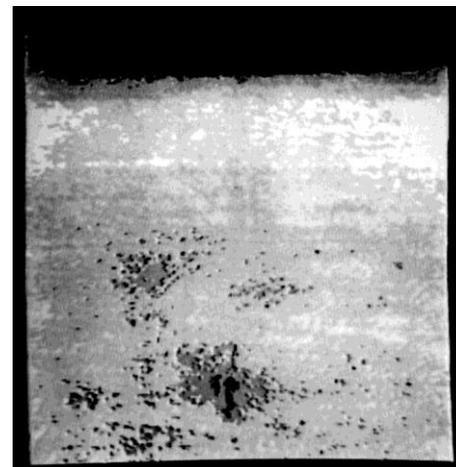
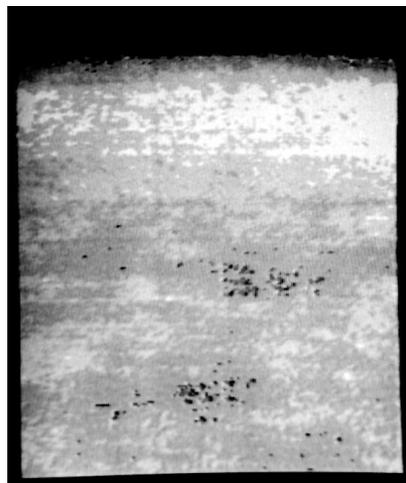


Суммирование изображений со сдвигом, масштабированием и пространственной фильтрацией

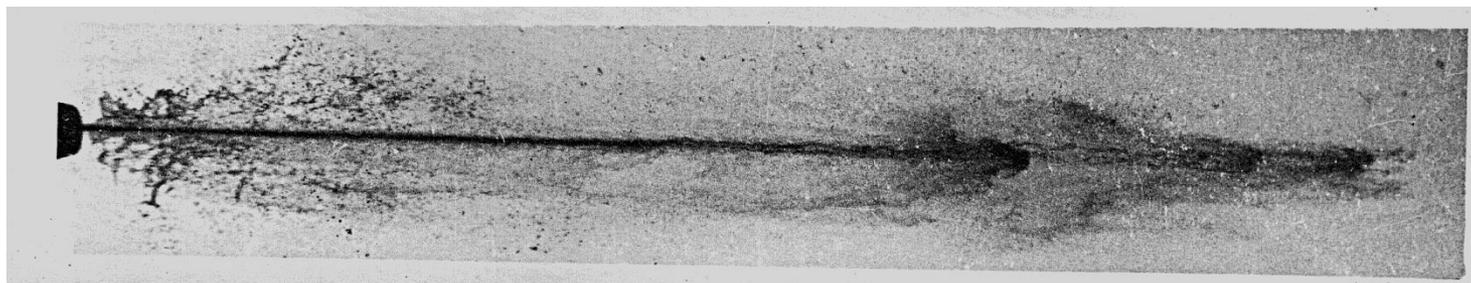
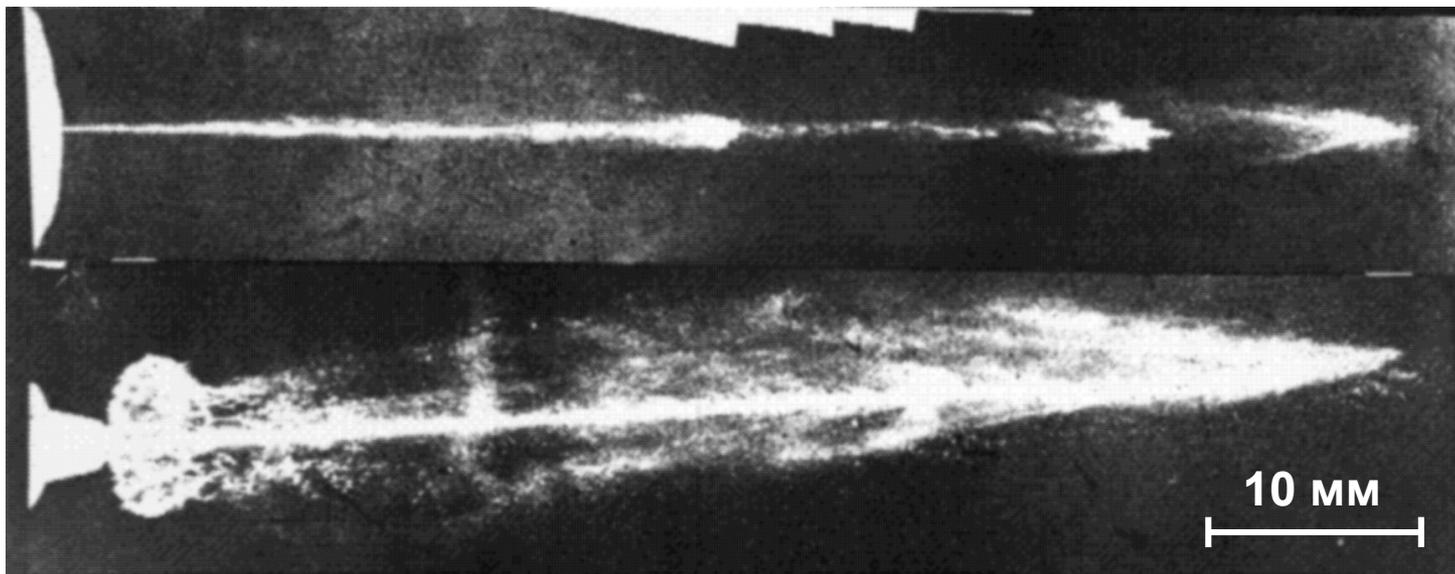


В результате томографической съемки было показано, что кавитационные кластеры появляются одинаково интенсивно как на стенках, так и в объеме. Следовательно, результаты полученные на УТ применимы для открытого водоема

Томографические сечения процесса кавитации воды в ударной трубке, полученные методом обратной проекции



**Струи топлива впрыснутые в сжатый воздух.
ПИР-100, трубка с бериллиевым окном,
безэкранный съемка на пленку**



По зарегистрированной рентгеновской съемкой внутренней структуре струй была построена новая модель смесеобразования в форсированном дизельном двигателе.

Вид внутри большой сферической взрывной камеры ИГиЛ СО РАН



Постановка эксперимента. Вид на оборудование внутри и снаружи взрывной камеры

Заряд ВВ с кумулятивным конусом

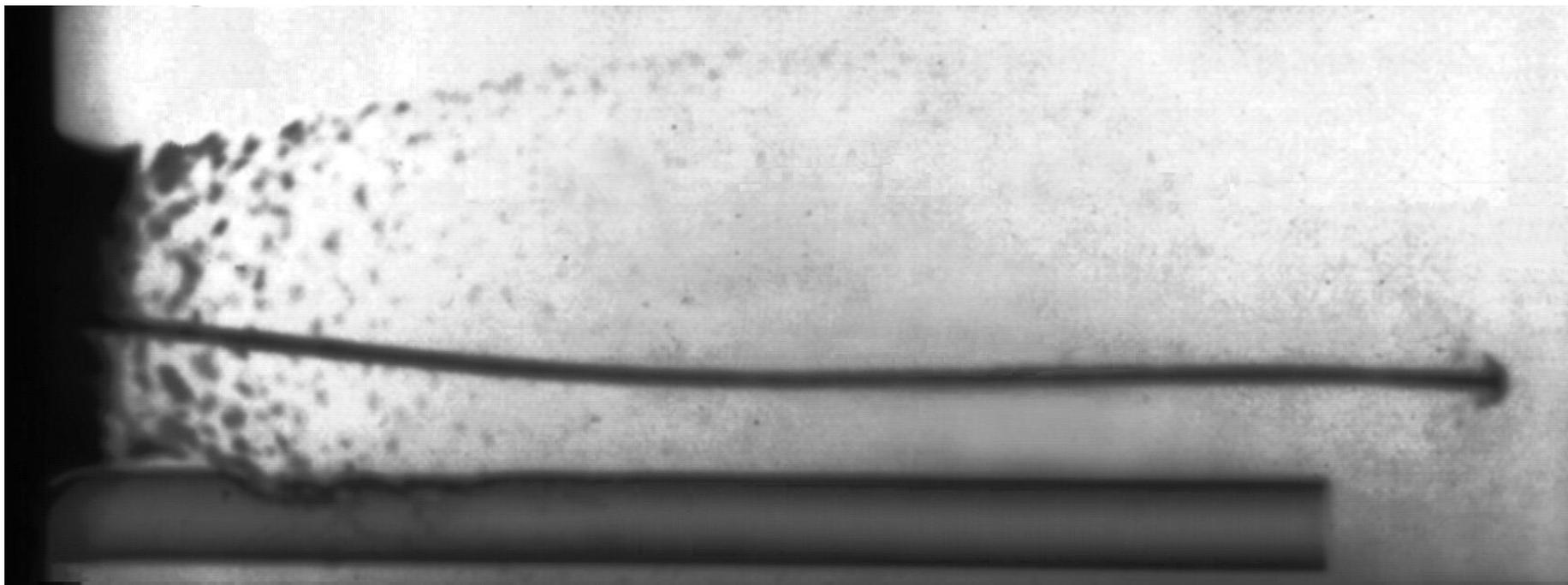


**Металлическая струя от кумулятивного заряда
после преодоления стальной стенки.**

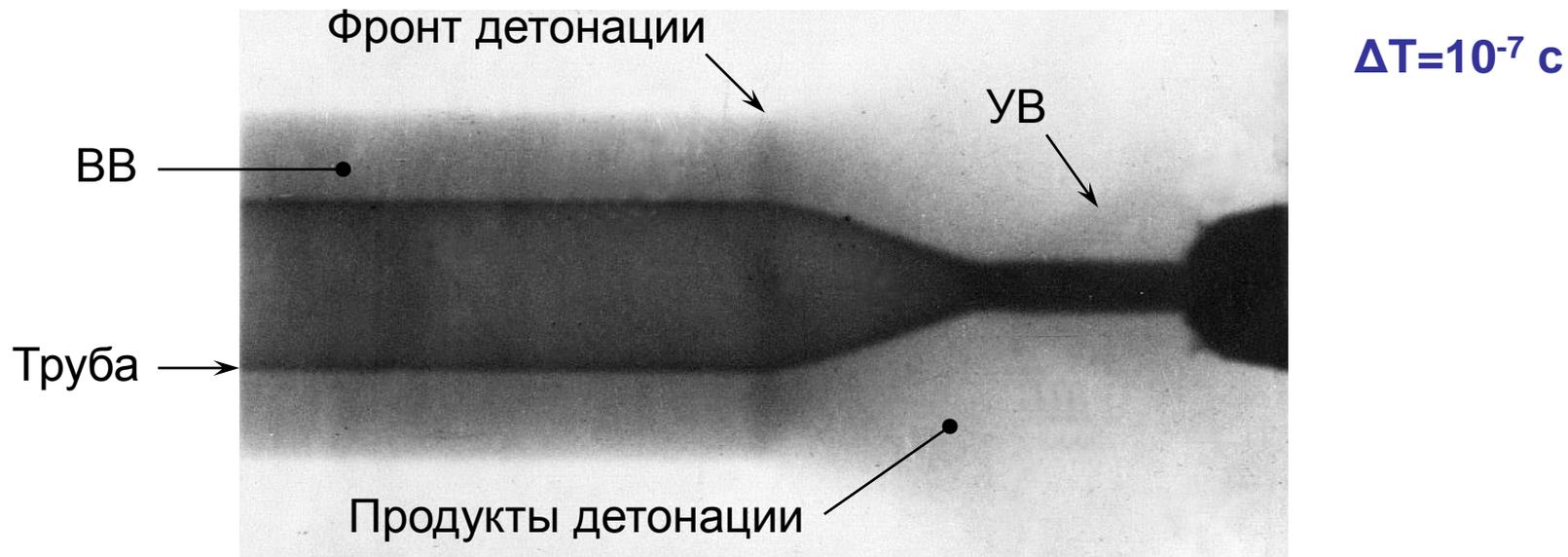
Рентгеновский снимок $\Delta T = 10^{-8}$ с

Снято импульсным рентгеновским аппаратом ПИР-240.

Скорость головы струи – 6 километров в секунду.



Рентгеновский снимок взрывного процесса с наблюдением ударных и детонационных волн



Снимок взрывного обжатия трубы до стержня, полученный аппаратом ПИР-600М
Напряжение на рентгеновской трубке 600 кВ, максимальная энергия квантов 600 кэВ

В эксперименте металлической труба с диаметром 35 мм и толщиной стенки 0,8 мм обжимается цилиндрическим зарядом взрывчатого вещества с внешним диаметром 70 мм.

Видны: труба, ВВ, фронт детонации, разлет продуктов детонации, ударная волна в продуктах детонации, сплошной стержень получающийся при схлопывании трубы.

Импульсный рентгеновский снимок удара профессионального и непрофессионального каратистов по деревянной дощечке.

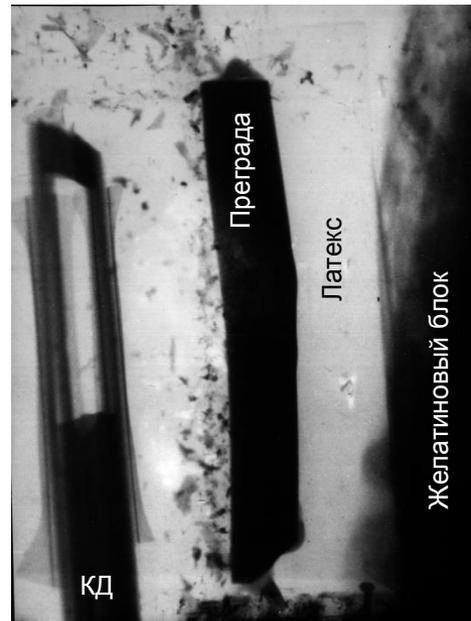
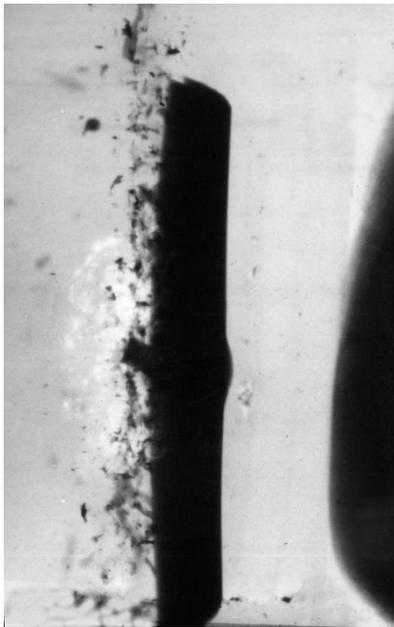
Пленка РМВ с одним (задним) усиливающим экраном ЭУВ-2 (CaWO_4).

Пленка РМВ без усиливающих экранов

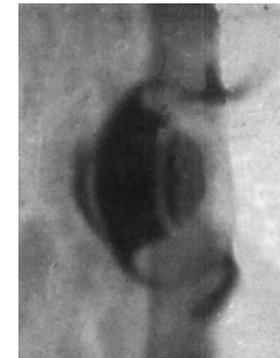
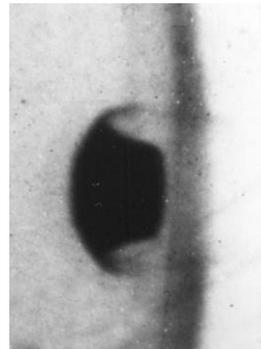
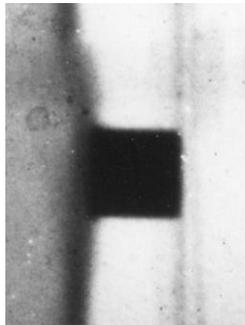
В отличие от обычных медицинских снимков здесь на одном снимке можно видеть объекты с разной плотностью: мягкие ткани, толстые кости, тонкие кости и деревянную дощечку.



Взаимодействие пуль и высокоскоростных снарядов с преградой Импульсная рентгеновская съемка. ИГиЛ СО РАН.



Калибр 7,62 мм. Преграда – 12 мм стали с пористым латексом и желатиновым блоком.
Виден стальной сердечник и разлет оболочки



Метание пластины на неподвижный цилиндр генератором плоской ударной волны.
Скорость ~ 3 км/с. Видно образование «усов» и отколов в цилиндре на поздних стадиях.

Спасибо за внимание!

Вопросы есть?

