

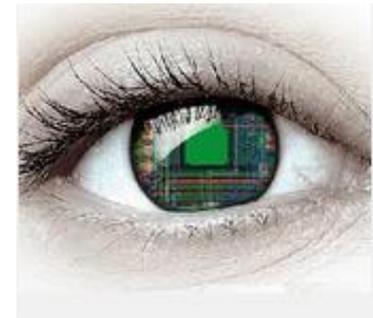
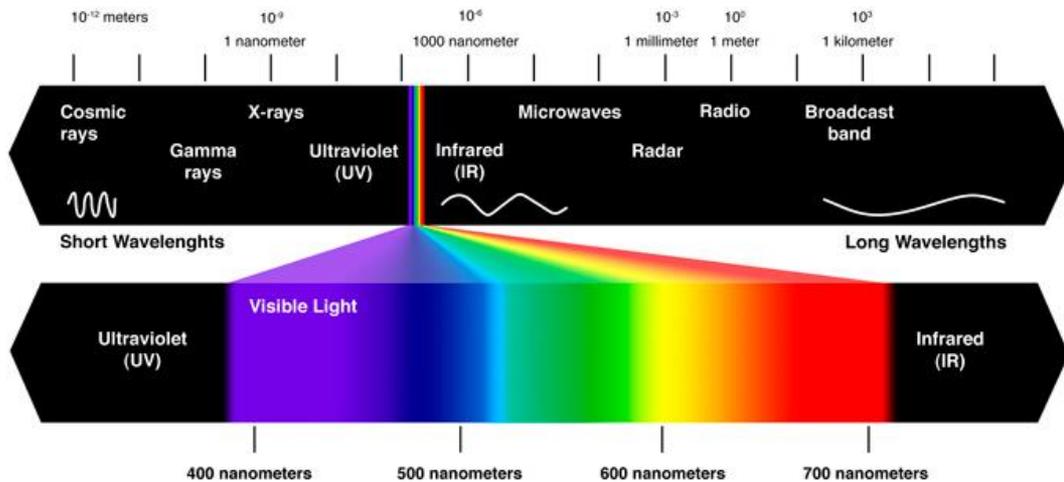
РАЗДЕЛ №3

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

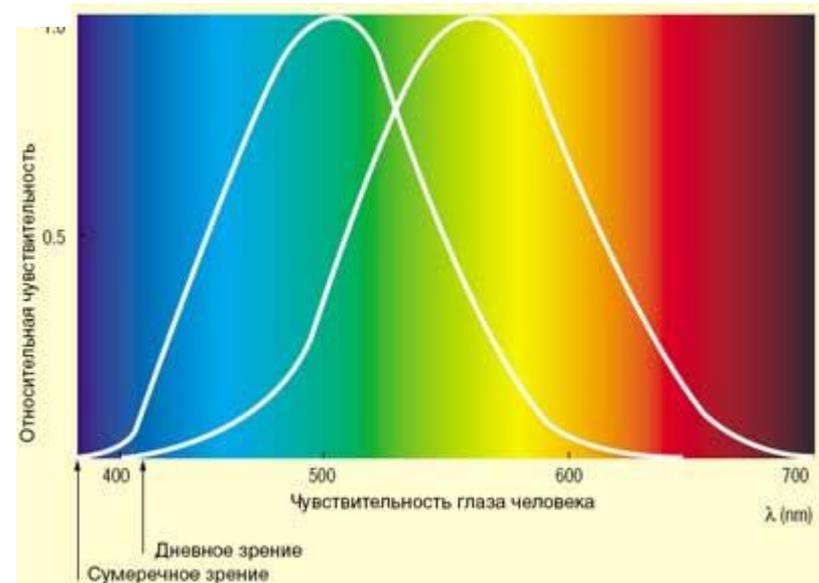


Фотометрический шар диаметром 2 метра для поверки светоизмерительных ламп и для измерения светового потока источников света

Элементы теоретической фотометрии



W [Вт]



Элементы теоретической фотометрии

Поток излучения (лучистый поток)	Φ_e или P	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	Вт	Световой поток
Сила излучения (энергетическая сила света)	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Вт·ср ⁻¹	Сила света
Объёмная плотность энергии излучения	U_e	$U_e = \frac{dQ_e}{dV}$	Дж·м ⁻³	Объёмная плотность световой энергии
Энергетическая светимость	M_e	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS_1}$	Вт·м ⁻²	Светимость
Энергетическая яркость	L_e	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS_1 \cos\varepsilon}$	Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹	Яркость
Интегральная энергетическая яркость	Λ_e	$\Lambda_e = \int_0^t L_e(t') dt'$	Дж·м ⁻² ·ср ⁻¹	Интегральная яркость
Облучённость (энергетическая освещённость)	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS_2}$	Вт·м ⁻²	Освещённость
Энергетическая экспозиция	H_e	$H_e = \frac{dQ_e}{dS_2}$	Дж·м ⁻²	Световая экспозиция
Спектральная плотность энергии излучения	$Q_{e,\lambda}$	$Q_{e\lambda} = \frac{dQ_e}{d\lambda}$	Дж·м ⁻¹	Спектральная плотность световой энергии

dS_1 — площадь элемента поверхности источника,

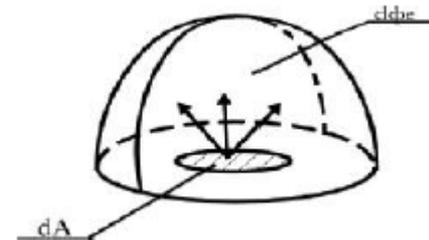
dS_2 — площадь элемента поверхности приёмника,

ε — угол между нормалью к элементу поверхности источника и направлением наблюдения.

Энергетические величины

- Энергетическая светимость

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad \left[\frac{\text{Bm}}{\text{M}^2} \right]$$



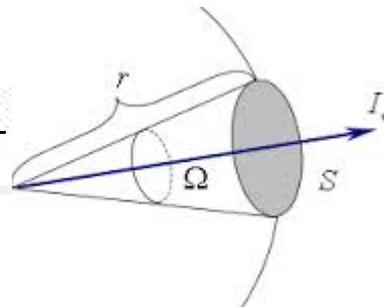
- Энергетическая освещенность

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad \left[\frac{\text{Bm}}{\text{M}^2} \right]$$



- Сила излучения

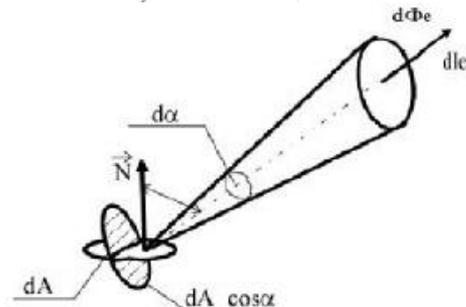
$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$$



- Энергетическая яркость

$$L_{e\alpha} = \frac{dI_{e\alpha}}{dA \cos \alpha} \quad \frac{\text{Bm}}{\text{cp} \cdot \text{M}^2}$$

$$L_{e\alpha} = \frac{d^2\Phi_{e\alpha}}{dA d\Omega \cos \alpha}$$

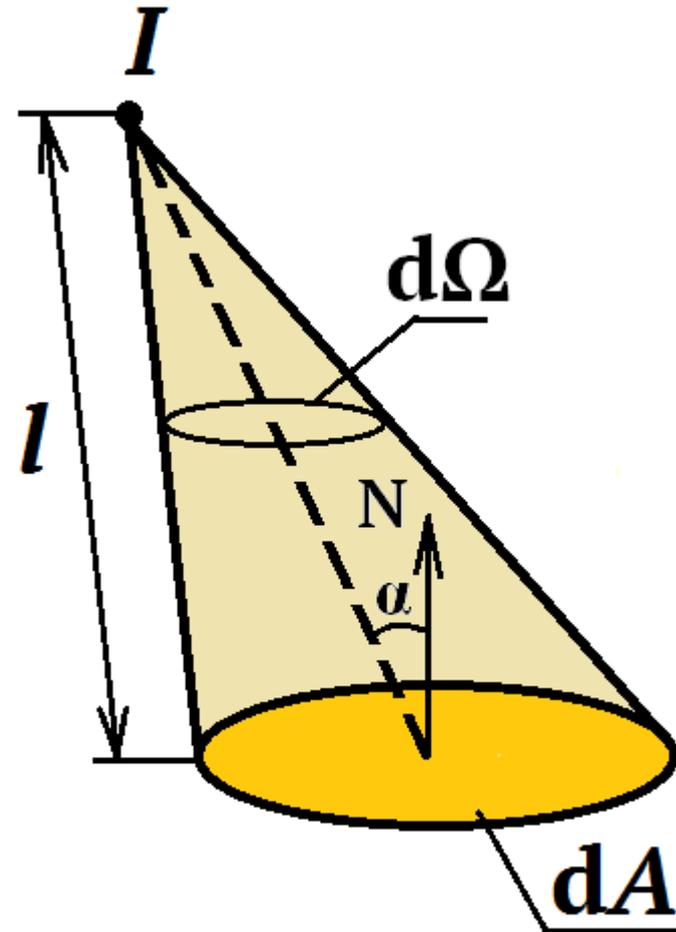


Световые величины

Световой поток	$\Phi_v = 683 \int_{0,38}^{0,76} V(\lambda) \Phi_s(\lambda) d\lambda$	Лм. (люмен)
Световая энергия	$Q_v = \int_0^t \Phi_v(t) dt$	Лм. · с
Сила света	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	Кд. (канделла)
Светимость	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA_1}$	$\frac{\text{Лм}}{\text{м}^2}$
Освещённость	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA_2}$	Лк. (люкс)
Яркость	$L_{v\alpha} = \frac{dI_{v\alpha}}{dA_1 \cos \alpha}$	$\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$

Основные фотометрические соотношения

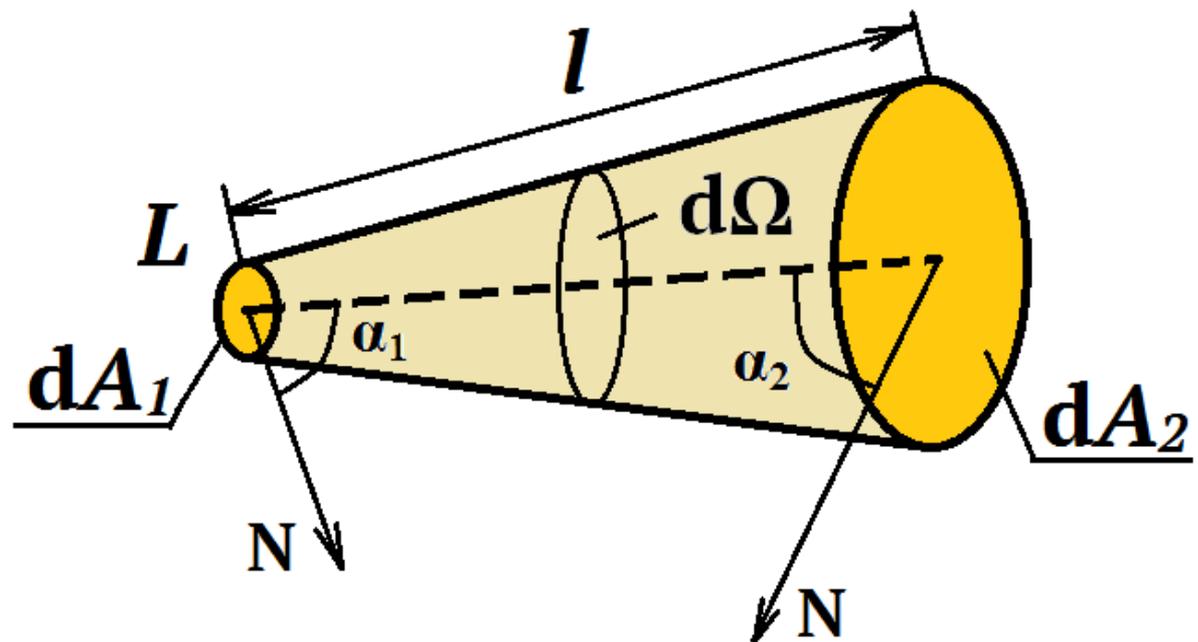
- Как найти освещенность, создаваемую точечным источником на поверхности?



$$E = ?$$

Основные фотометрические соотношения

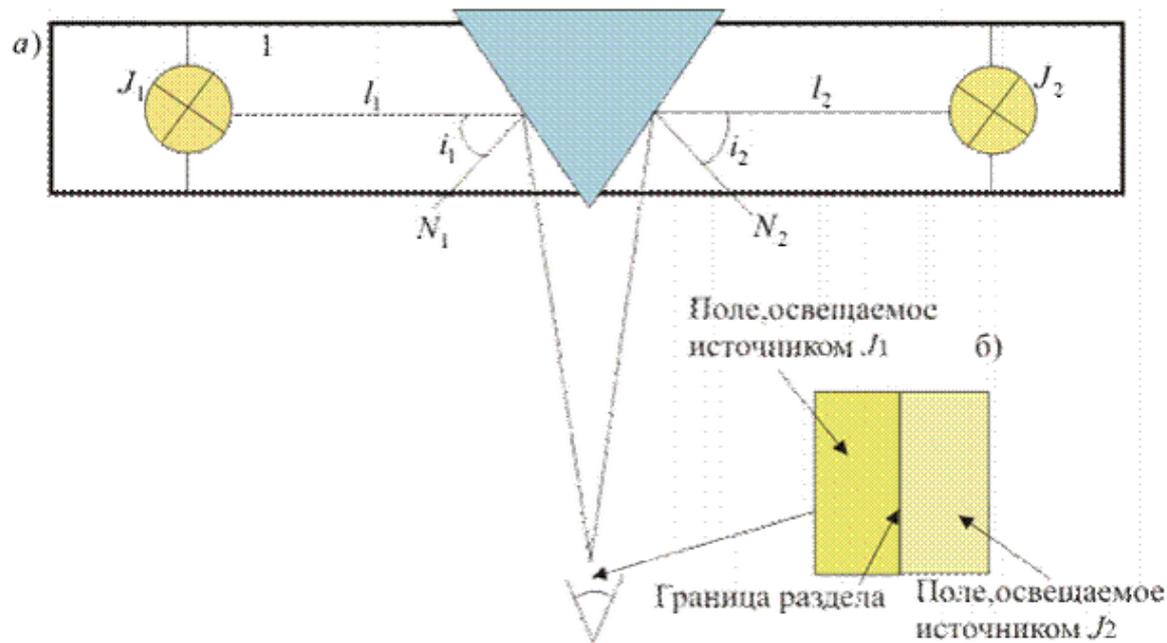
- Как найти поток излучения, поступающий с одной освещаемой площадки на другую площадку?



$$d\Phi = ?$$

Методы измерений в фотометрии

- Визуальные (субъективные)
 - глаз реагирует на яркость
 - нет количественной оценки



а) Схема фотометра Бунзена б) Вид полей сравнения для измерения силы света и яркости источника

Методы измерений в фотометрии

- Фотоэлектрические (объективные)
 - основаны на измерении тока или напряжения
 - измерения с высокой точностью (0,01 – 0,05%)

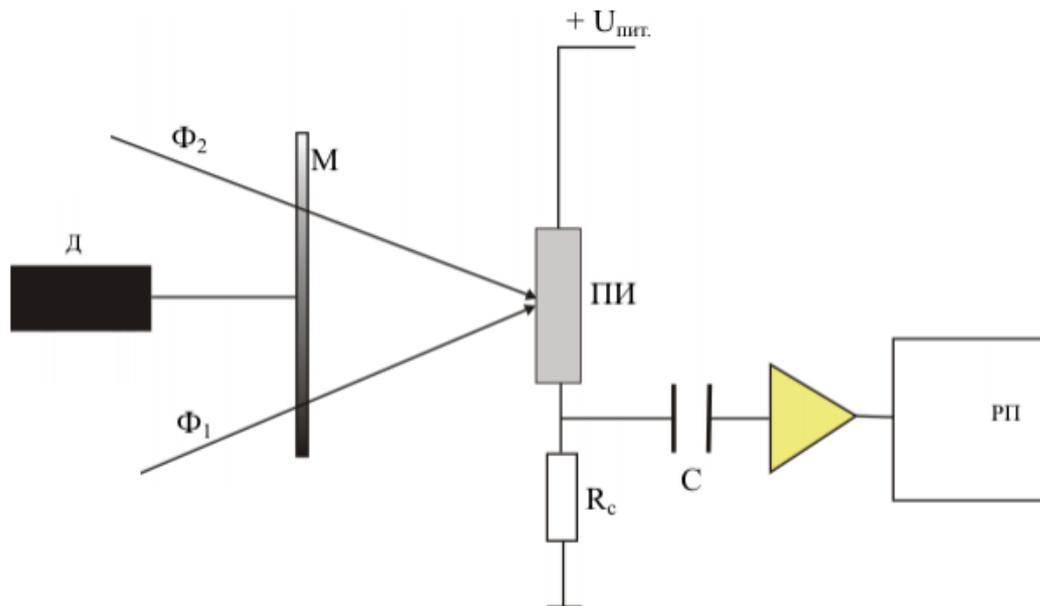
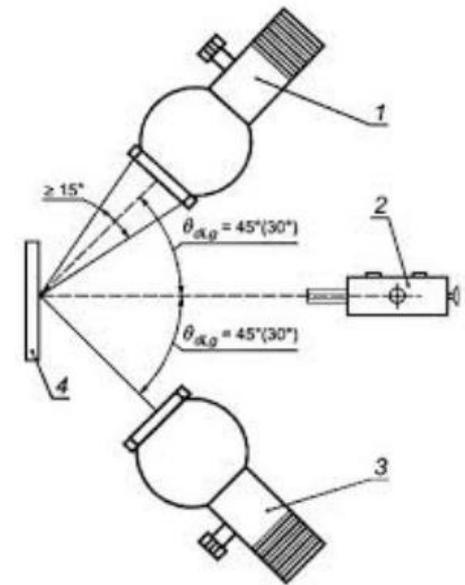
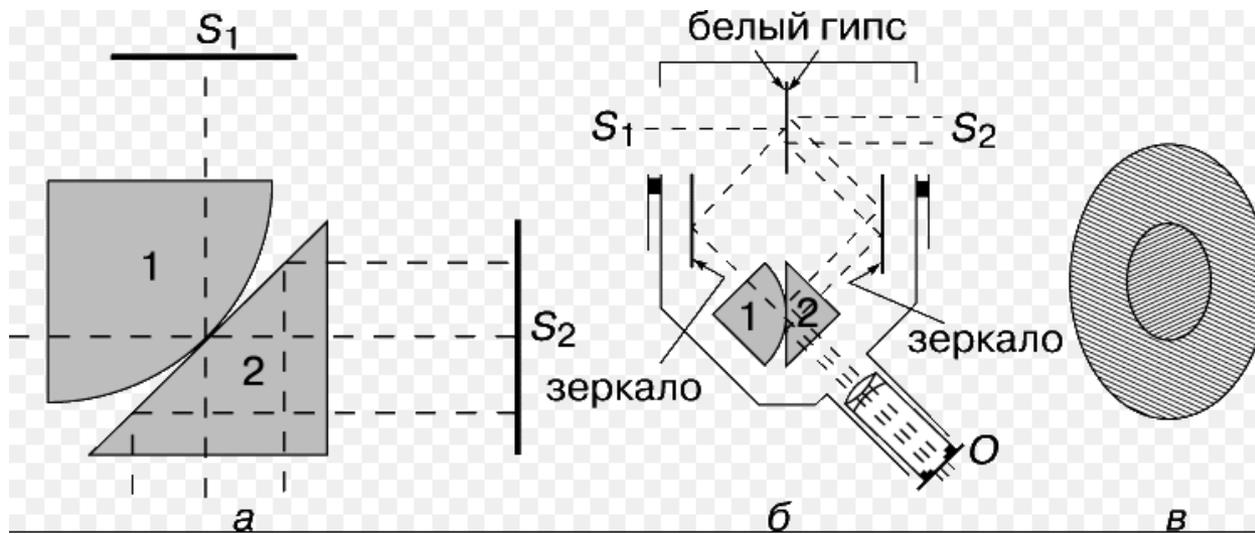


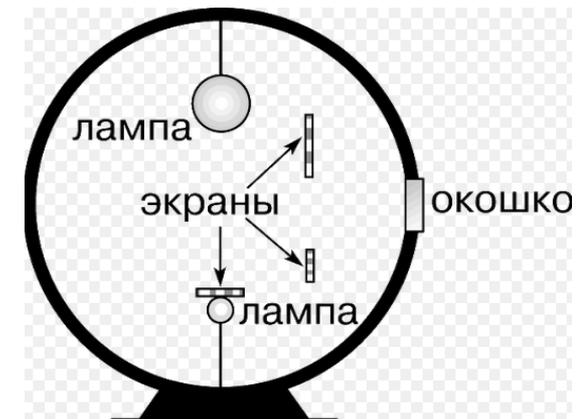
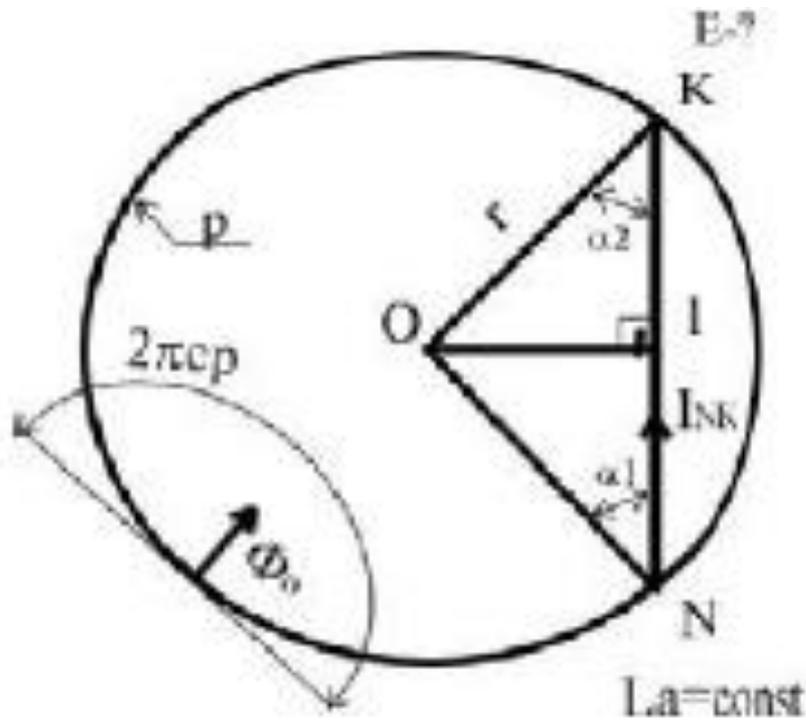
Схема фотометра с поочередным сравнением потоков Φ_1 и Φ_2

Визуальные фотометры и их элементы



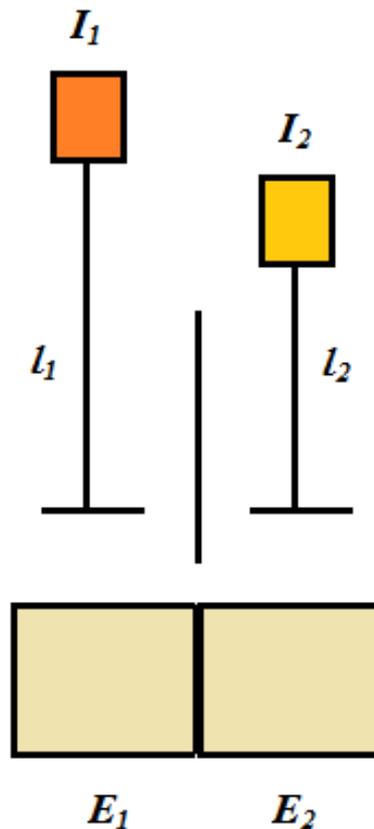
Визуальные фотометры и их элементы

- Теория фотометрического шара



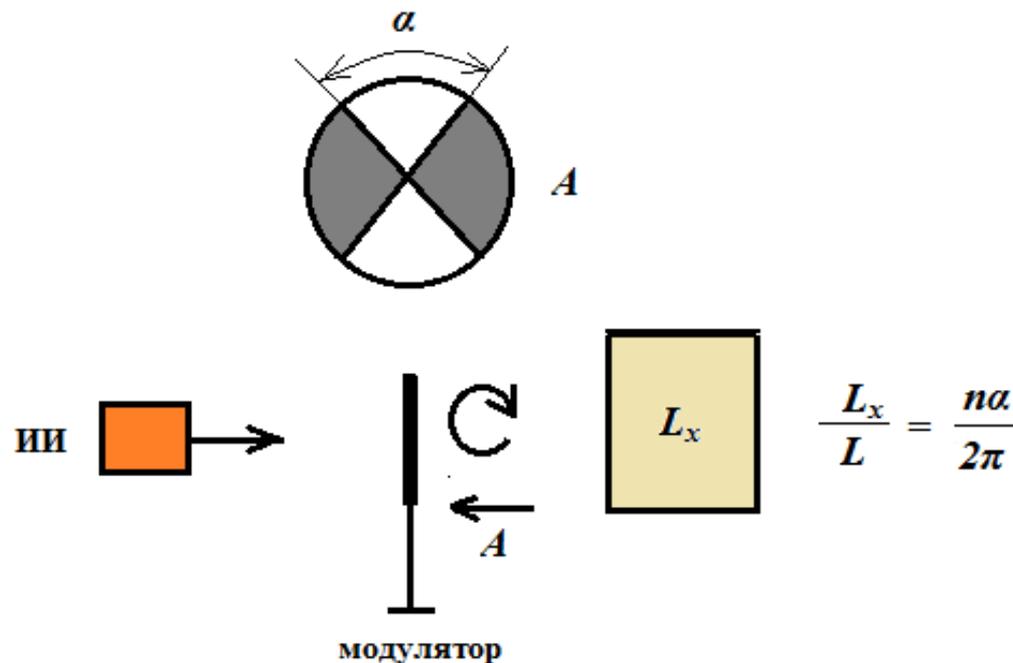
Методы и средства визуальной фотометрии

- **Метод квадратов расстояний**



Методы и средства визуальной фотометрии

- **Метод прерывистого освещения**



L_x – субъективно воспринимаемая яркость источника

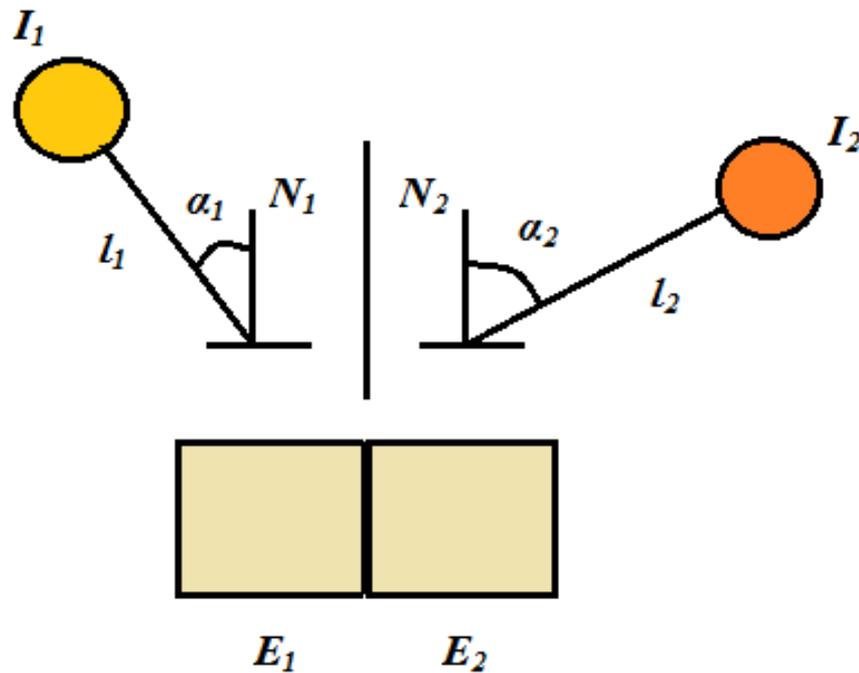
L – реальная яркость источника

n – число вырезов в диске

α – угол секторного выреза

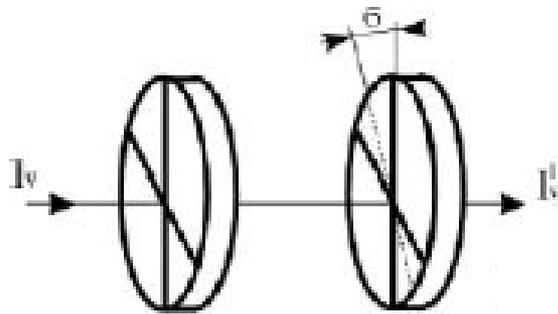
Методы и средства визуальной фотометрии

- **Метод косинусов**



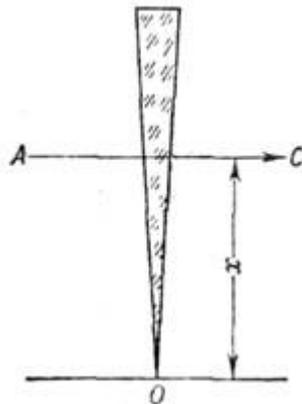
Визуальные фотометры и их элементы

- Ослабители на основе поляроидов



$$I_v' = \frac{1}{2} I_v \cos^2 \delta$$

- Фотометрические клинья



$$\tau = \Phi / \Phi_0 = (1 - \rho)^2 \times \times 10^{k \cdot x}$$

Визуальные фотометры и их элементы

- **Нейтральные светофильтры**

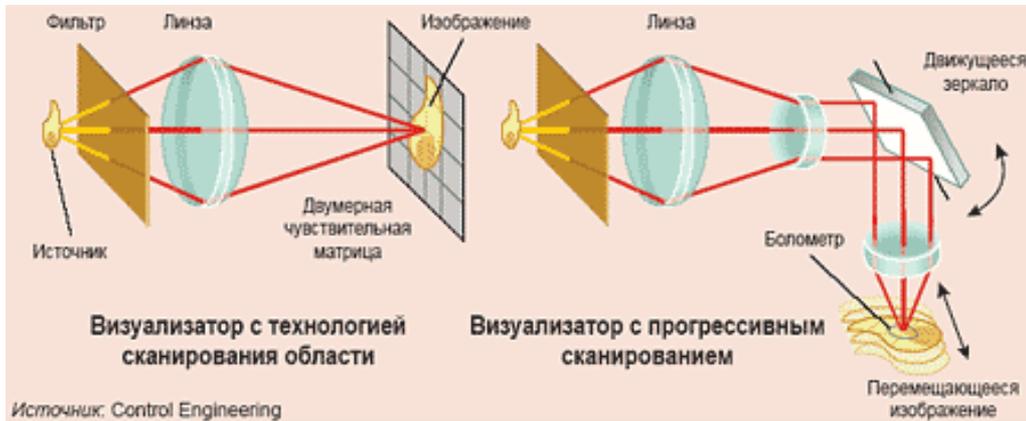


- **Диафрагмы**



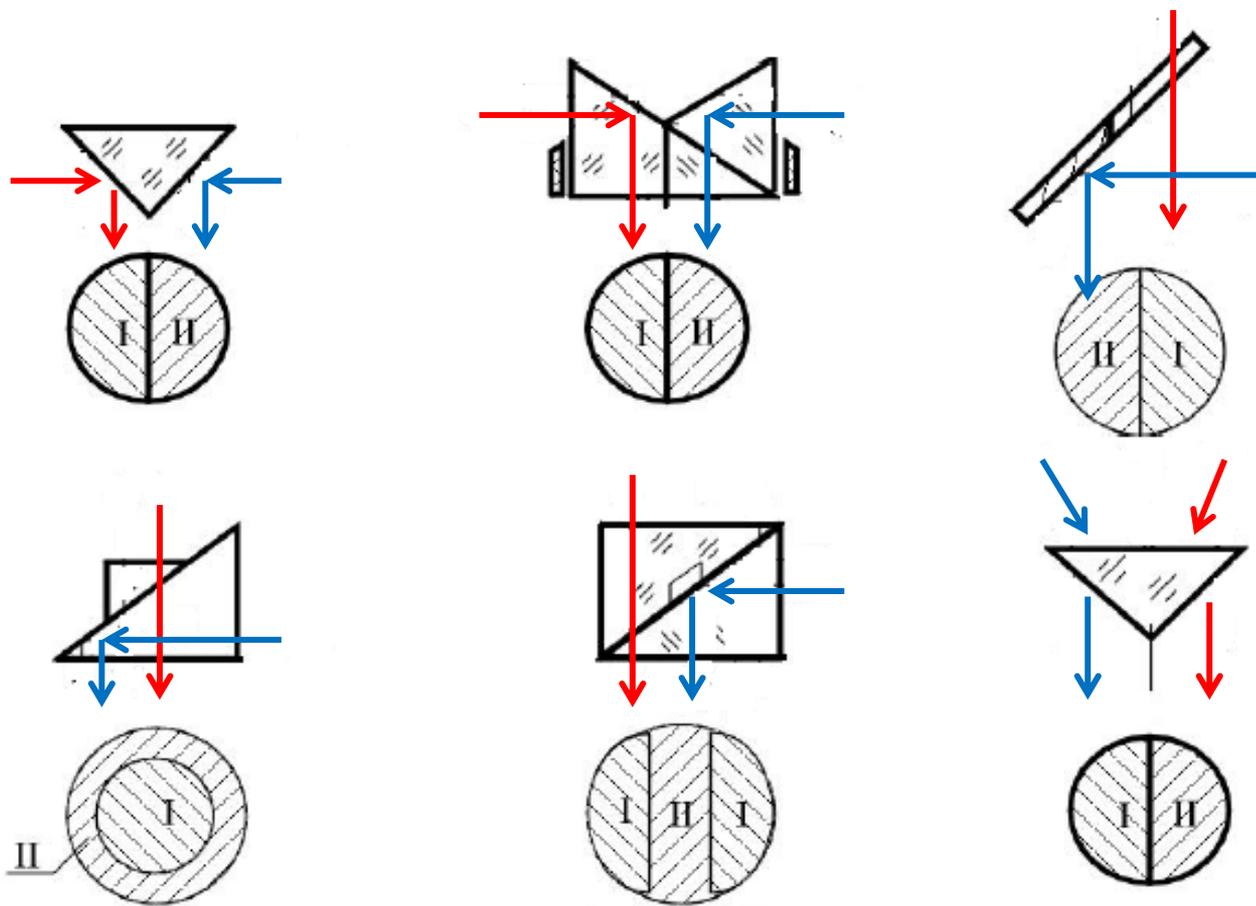
Визуальные фотометры и их элементы

- **Испытательные пластины**



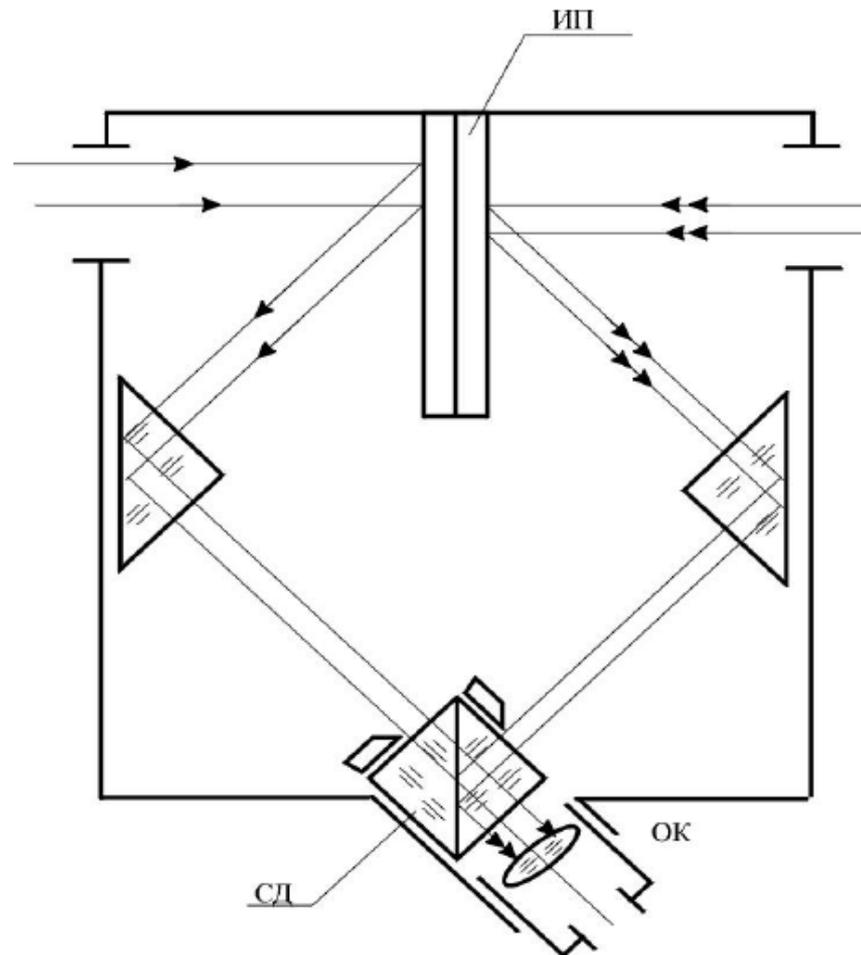
Визуальные фотометры и их элементы

- Устройства для образования полей сравнения



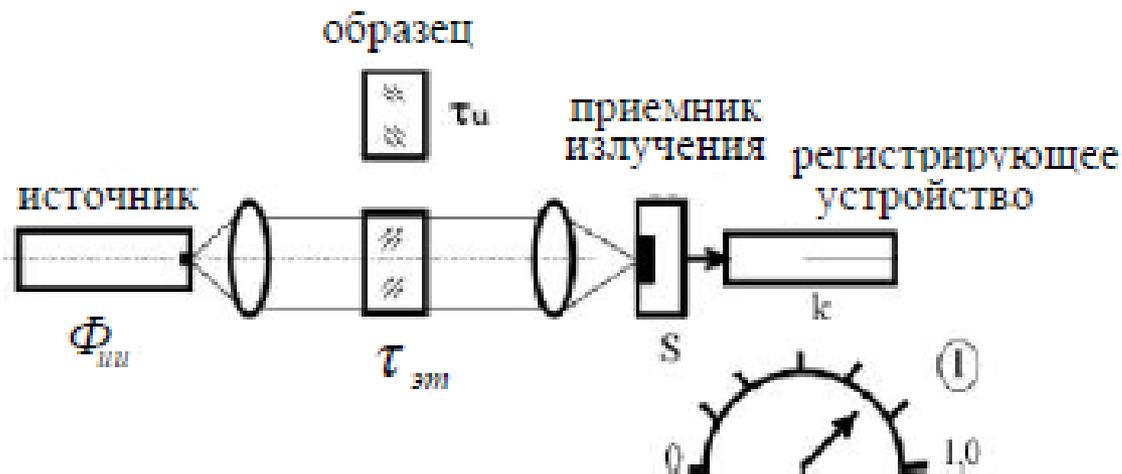
Визуальные фотометры и их элементы

- Устройство фотометрической головки



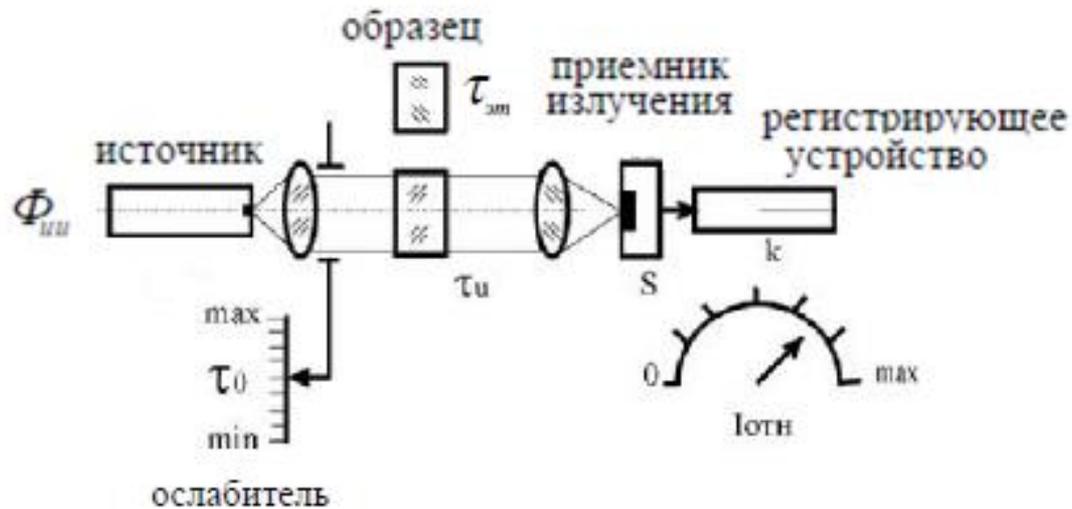
Принципы построения объективных фотометров

- Приборы с одним оптическим каналом (пропорциональный метод измерения)



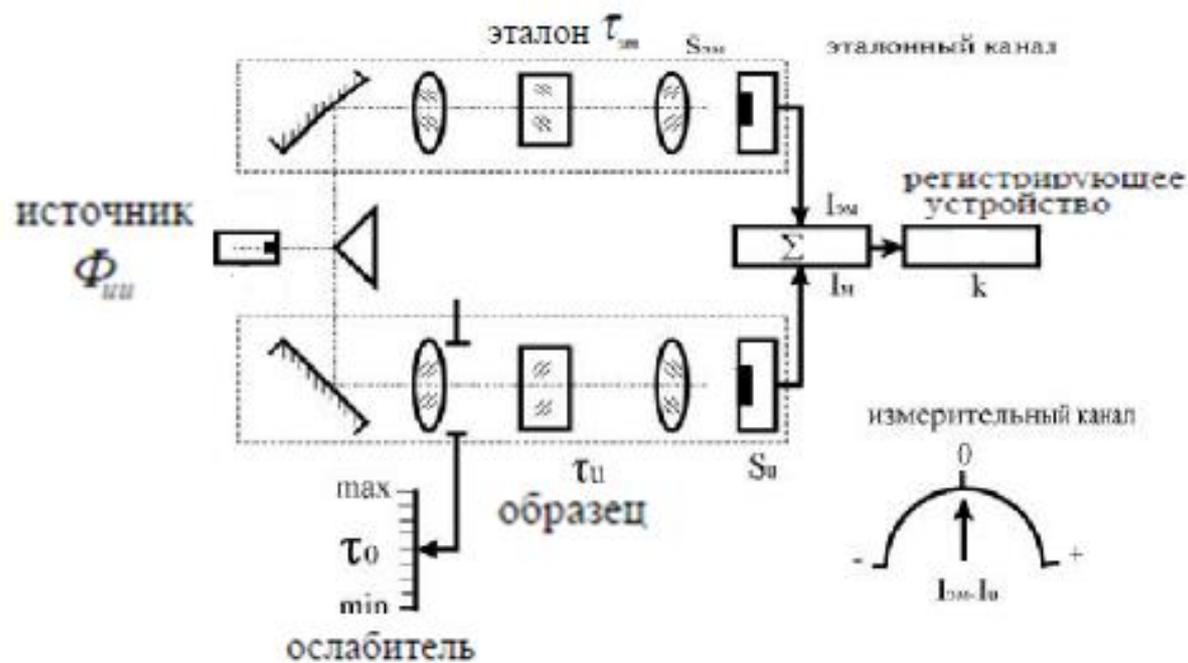
Принципы построения объективных фотометров

- Приборы с одним оптическим каналом и регулируемым ослабителем (компенсационный метод измерения)

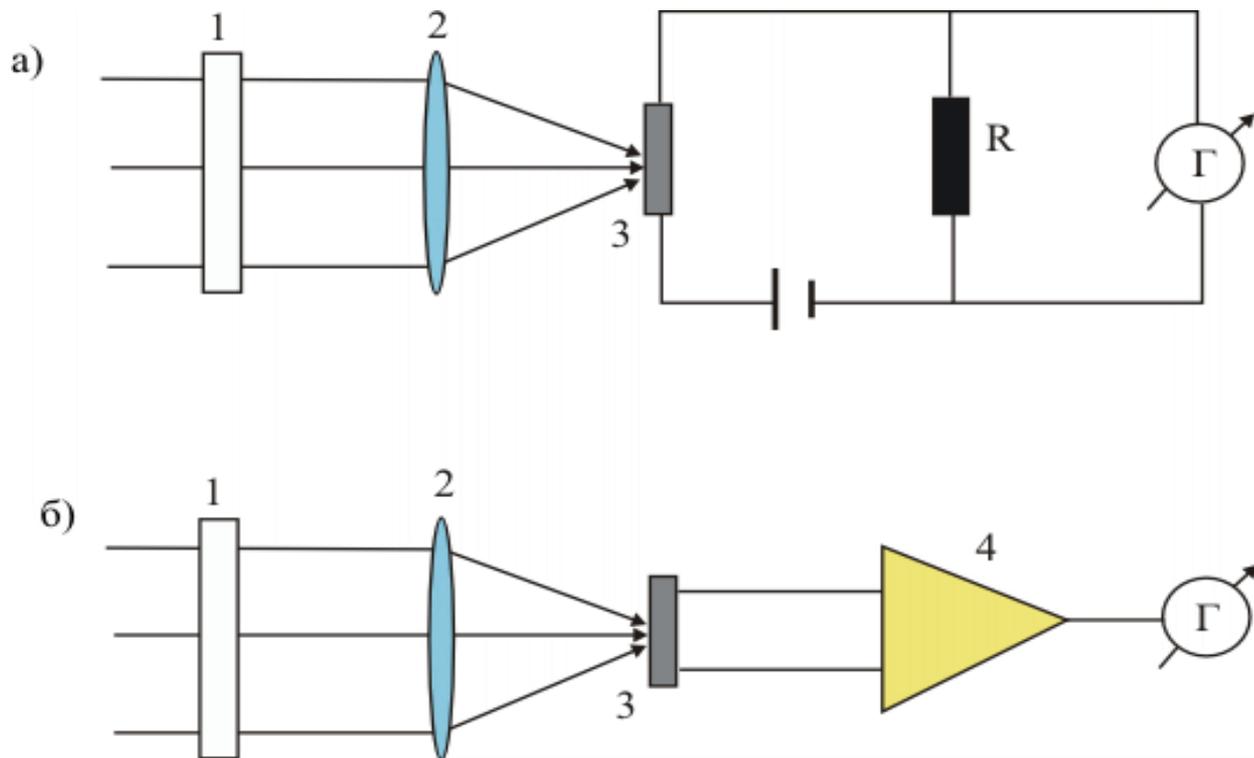


Принципы построения объективных фотометров

- Приборы с двумя оптическими каналами (компенсационный метод измерения)



Фотометры прямого отсчета



Схемы фотометров прямого отсчета:

а) Обычная схема. б) Схема с усилителем (4).

1 - светофильтр; 2 - объектив; 3 - приемник излучения;

Г - гальванометр.

Фотометры относительного отсчета

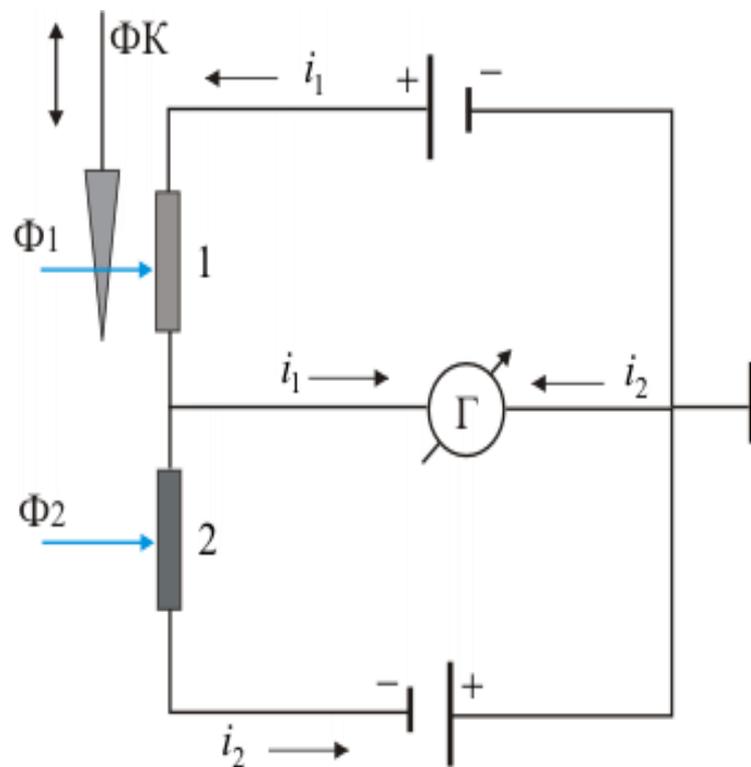


Схема дифференциального фотометра
(для одновременного сравнения потоков
излучения)

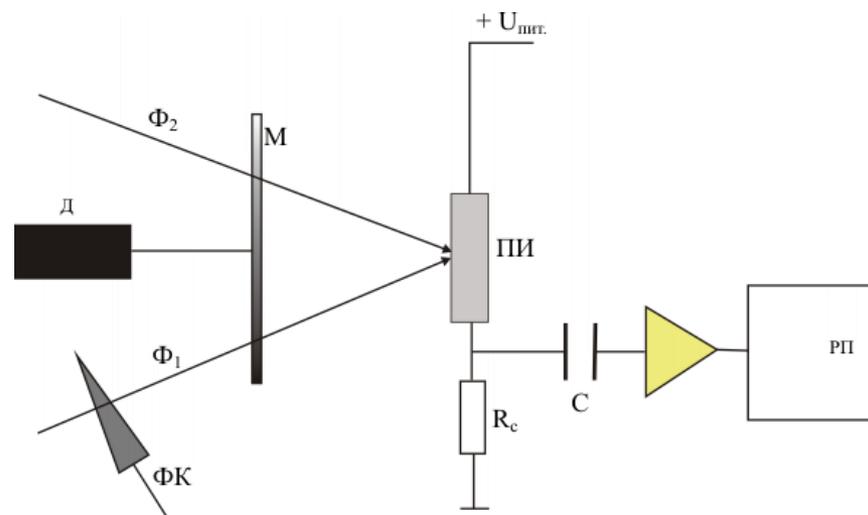
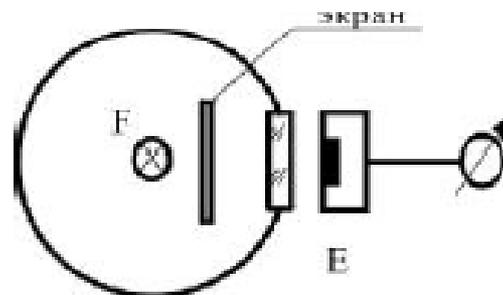


Схема фотометра с поочередным
сравнением потоков

Измерение основных фотометрических величин

- Измерение потока излучения → ШАРОВОЙ ФОТОМЕТР



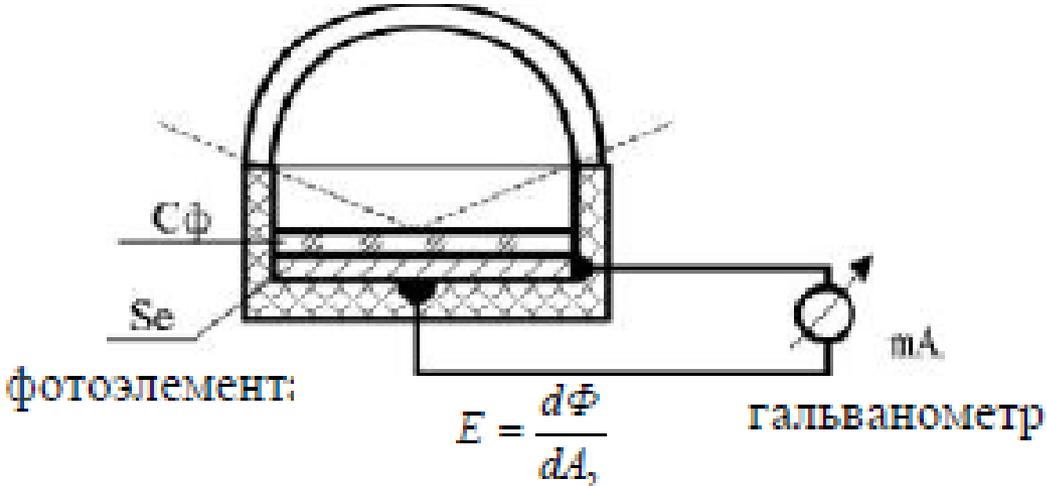
$E = k\Phi$, где k – коэффициент пропорциональности, постоянный для данного шара.

$$k = \frac{\rho}{4\pi R^2(1-\rho)}$$

$$E_{\text{зм}} = k\Phi_{\text{зм}} \qquad \Phi_{\text{и}} = \frac{E_{\text{и}}}{E_{\text{зм}}} \Phi_{\text{зм}}$$
$$E_{\text{и}} = k\Phi_{\text{и}}$$

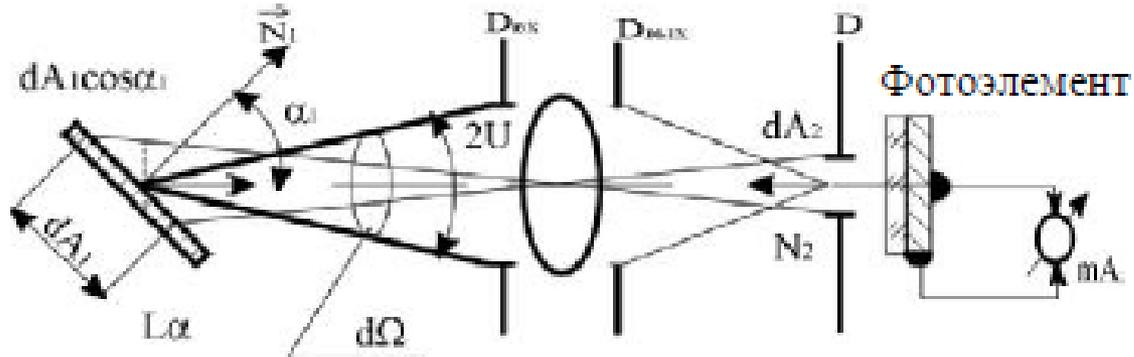
Измерение основных фотометрических величин

- Измерение освещенности → ЛЮКСМЕТР



Измерение основных фотометрических величин

- Измерение яркости → ЯРКОМЕТР

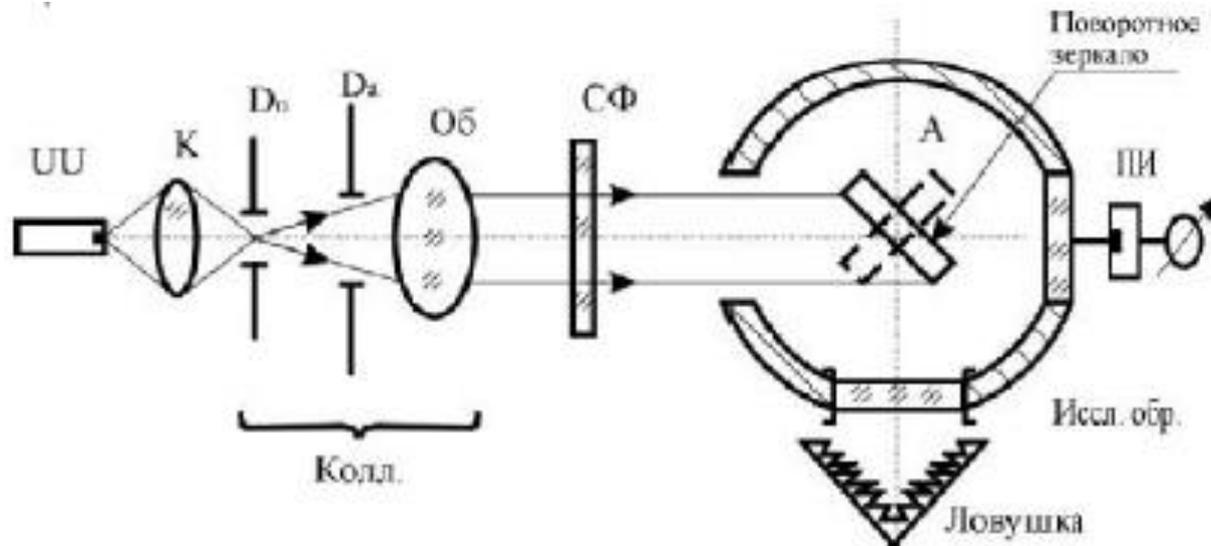


$$L_{\alpha} = \frac{d^2\Phi}{dA_1 d\Omega \cos\alpha_1}$$



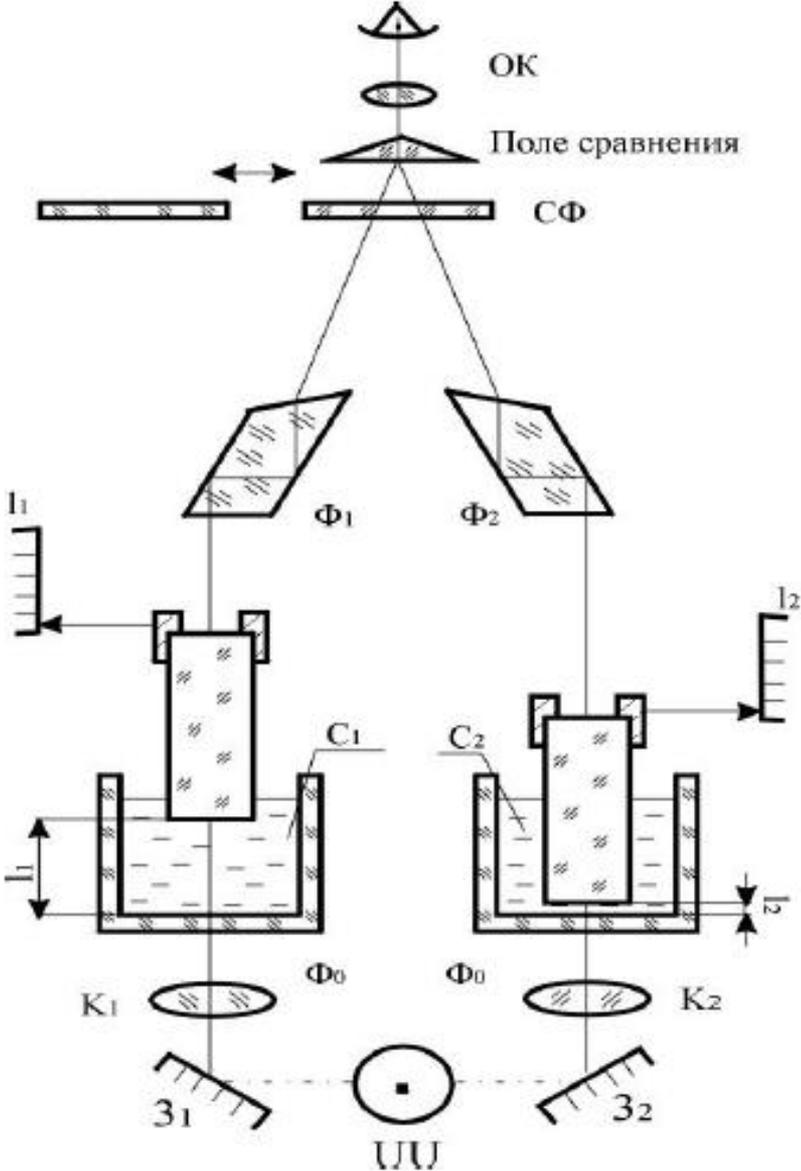
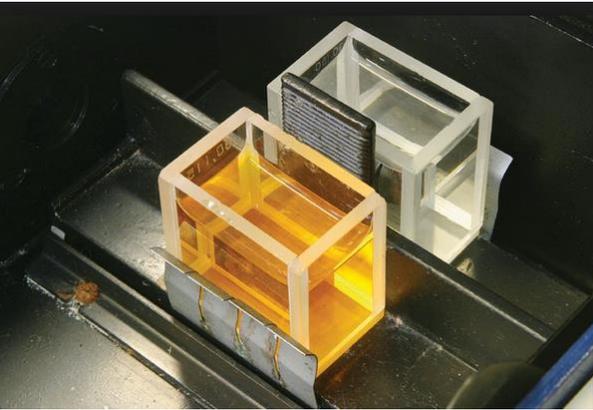
Измерение основных фотометрических величин

- Измерение коэффициентов пропускания и отражения прозрачных и диффузно рассеивающих материалов → ФОТОМЕТР СРАВНЕНИЯ



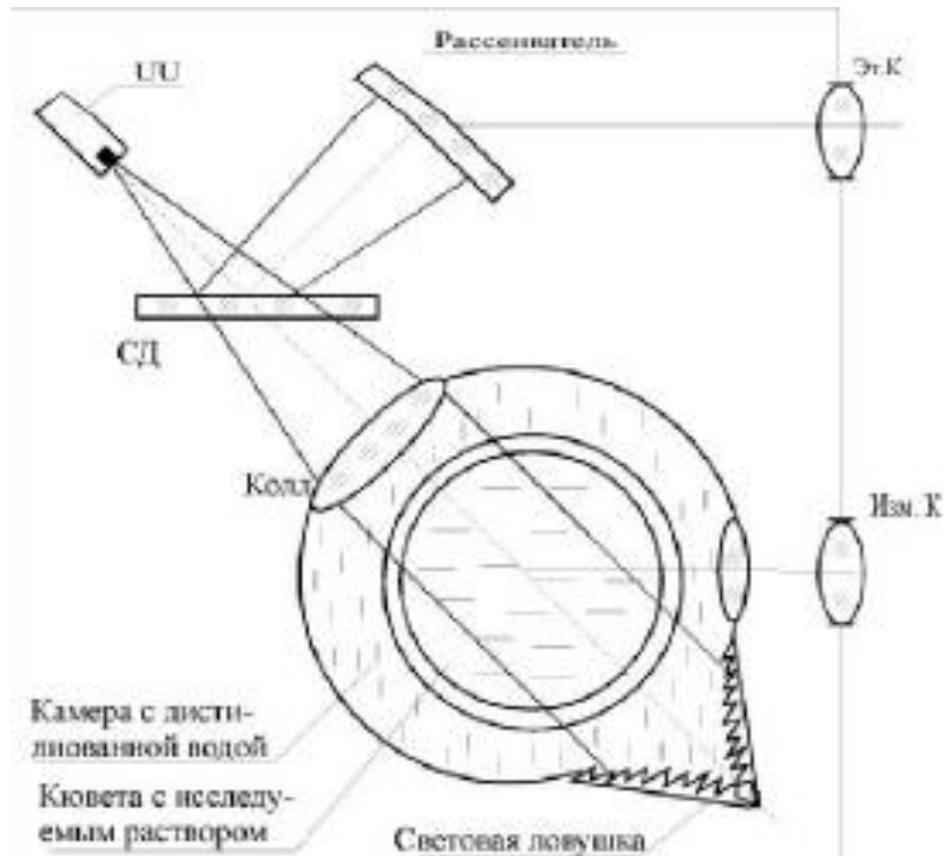
Измерение концентрации и состава вещества

- ВИЗУАЛЬНЫЙ ФОТОКОЛОРИМЕТР



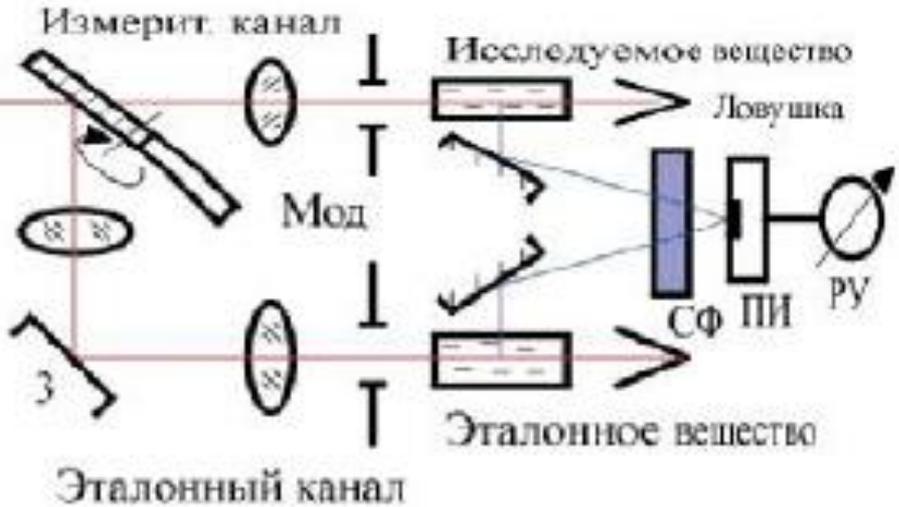
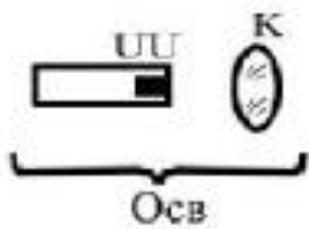
Измерение концентрации и состава вещества

- НЕФЕЛОМЕТР

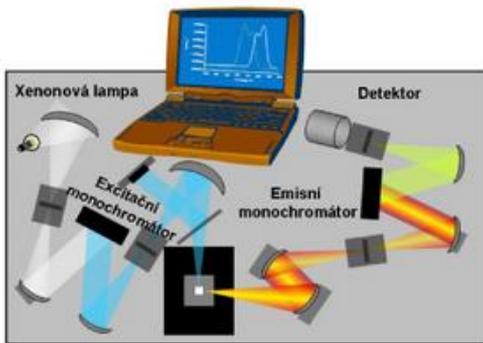


Измерение концентрации и состава вещества

• ФЛУОРИМЕТР



Спектрофлуорометр Fluoromax 4



Измерение энергетических характеристик ЛИ

- Непрерывного действия

P [Вт] - мощность излучения

- Импульсные

Полная E импульса

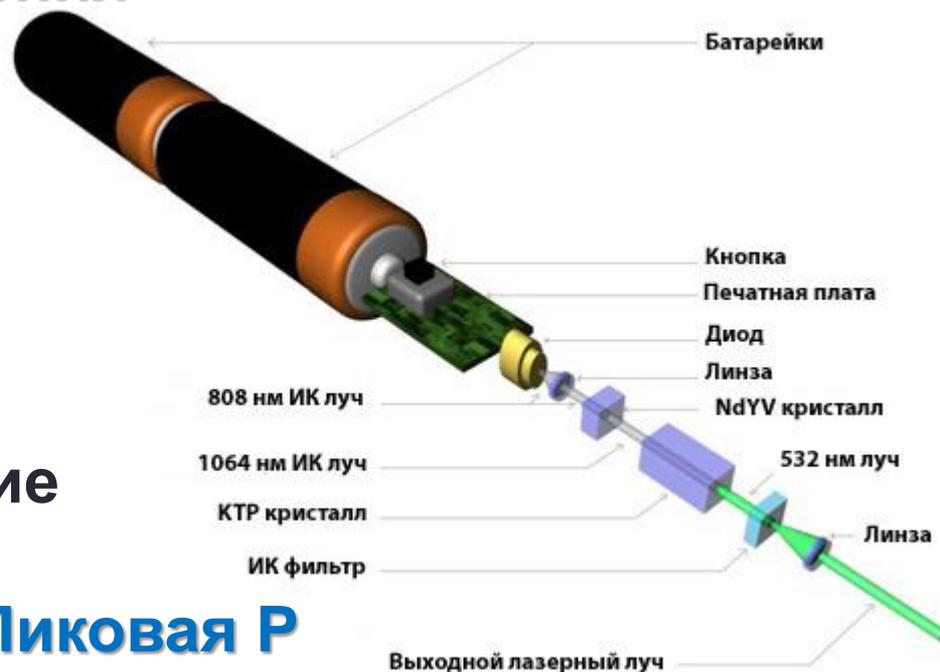
Средняя P импульса

Пиковая P излучения

- Импульсно-периодические

Полная E / Средняя P / Пиковая P

Средняя P за период



Измерение энергетических характеристик ЛИ

Трудности и ограничения при измерении

- Малая длительность импульсов излучения
- Большие P и E излучения \rightarrow стойкость материала
- Малые P и E излучения \rightarrow чувствительность ПИ



Измерение энергетических характеристик ЛИ

Характеристики приемников излучения

- Интегральная чувствительность ПИ (коэффициент преобразования)

$$S_u = \frac{U_{\text{вых}}}{P} \quad \text{В/Вт}$$

- Пороговая чувствительность ПИ

$$P_{\text{пор}} = P \frac{U_{\text{вых.с}}}{\sqrt{U_{\text{вых.ш}}^2}} \frac{1}{\sqrt{\Delta f}} \quad \left(\frac{\text{Вт}}{\text{Гц}^{1/2}} \right)$$

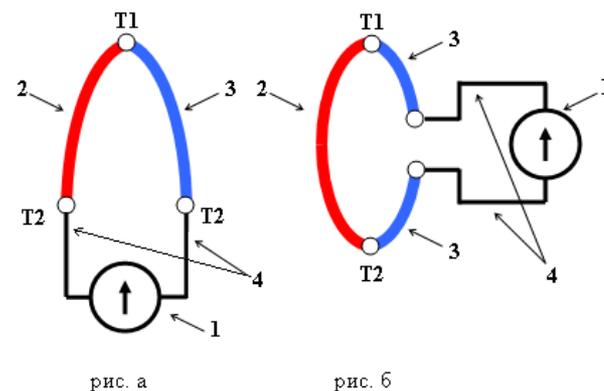
- Обнаружительная способность ПИ

$$D^* = \left(\frac{P_{\text{пор}}}{\sqrt{F}} \right)^{-1} \quad \left(\frac{\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}}{\text{Вт}} \right)$$

Измерение энергетических характеристик ЛИ

Измерения с тепловыми приемниками (колориметры)

- Термопары (термоэлектрический эффект)
- Болометры (эффект изменения сопротивления)
- На эффекте изменения поляризации пироактивного кристалла при изменении его T



1 – измерительный прибор
2, 3 – термоэлектроды
4 – соединительные провода
T1, T2 – температура «горячего» и «холодного» спаев термопары

Измерение энергетических характеристик ЛИ

Измерения с тепловыми приемниками (колориметры)

- + Могут применяться практически в любой области спектра
- + Тепловые приемники неселективны, т.е. их чувствительность не меняется по спектру
- + Можно проводить абсолютные измерения
- + Световые характеристики линейны

- Низкая чувствительность
- Большая инерционность

Измерение энергетических характеристик ЛИ

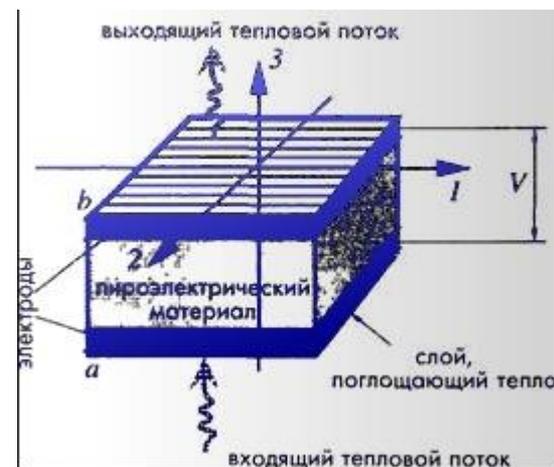
Измерения с тепловыми приемниками (колориметры)

- Пирозлектрические датчики (эффект изменения поляризации пироактивного кристалла при изменении его T)

$$I = A_0 \gamma \frac{d\Delta T}{dt}$$

γ – пирозлектрический коэффициент;
 A_0 – площадь чувствительного элемента

- + высокое быстродействие
- низкие выходные токи



Измерение энергетических характеристик ЛИ

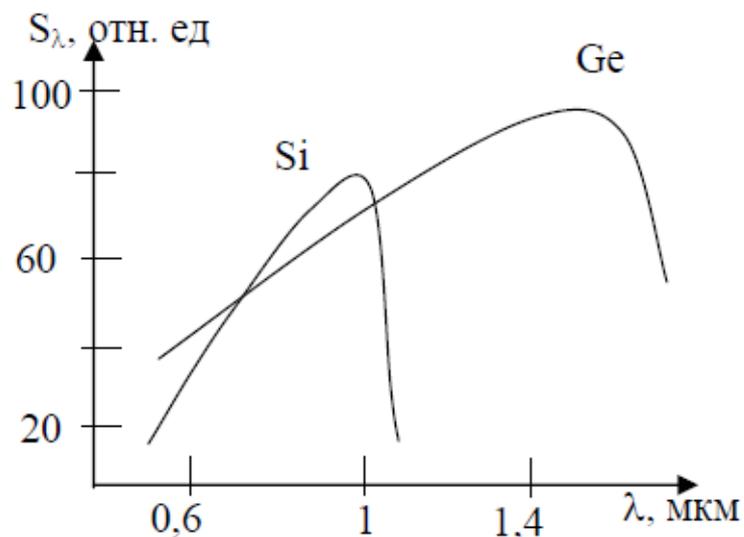
Измерения с использованием фотодиодов

Внешний фотоэффект

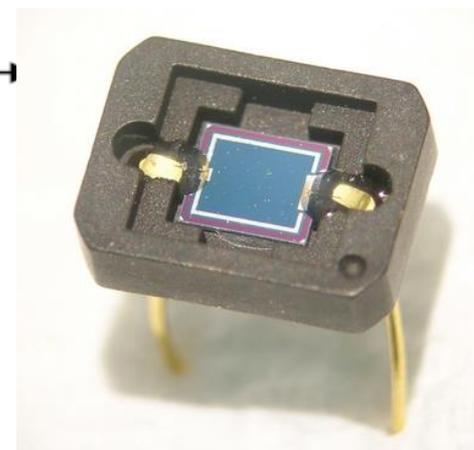
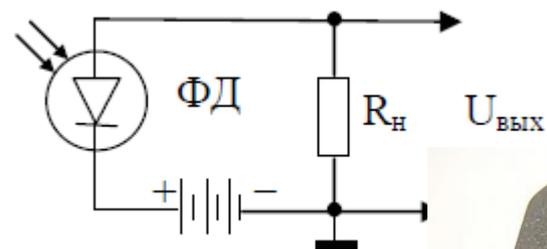
- Фотоэлементы
- ФЭУ

Внутренний фотоэффект

- Фоторезисторы
- Фототранзисторы
- **Фотодиоды**

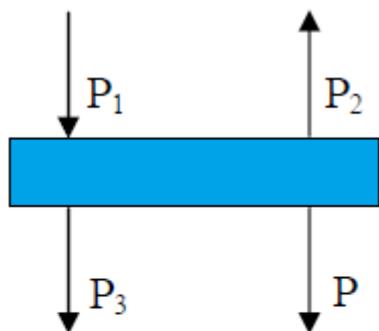


относительные
спектральные характеристики
германиевых и кремниевых
фотодиодов



Измерение энергетических характеристик ЛИ

Пондеомоторный принцип измерения



Пондеромоторный принцип измерения

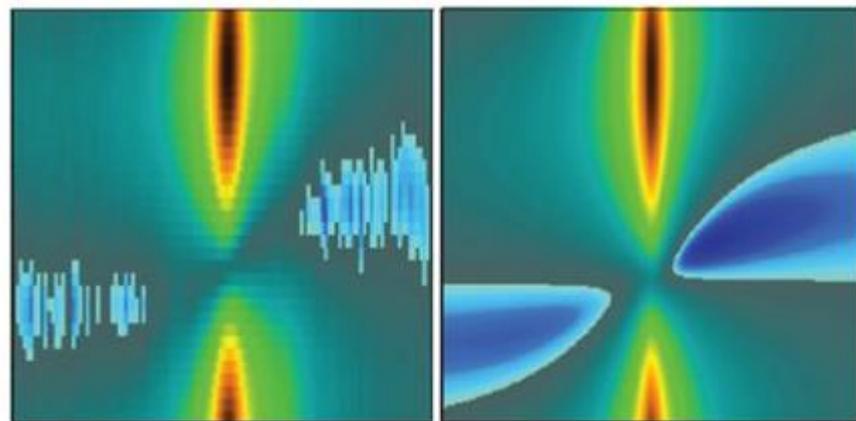
$$P_1 = N h \nu / c \quad P_2 = R P_1 \quad P_3 = (1 - R) T P_1$$

$N h \nu$ представляет собой энергию фотонов, падающих на пластину за одну секунду, т. е. мощность излучения P

$$P_1 = P_3 - P_2 + P.$$

$$P = \frac{N h \nu}{c} [(1 + R) - (1 - R) T]$$

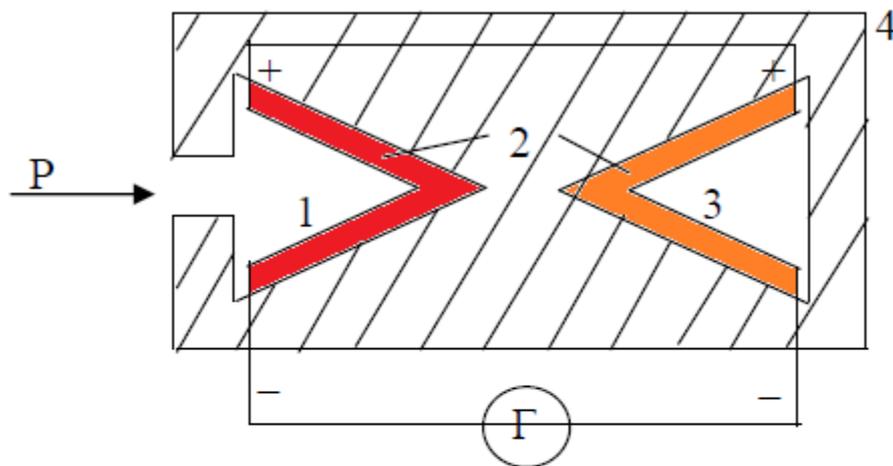
$$F = \frac{P}{c} [(1 + R) - (1 - R) T]$$



Исследователи из Berkeley Lab впервые наблюдали квантовые оптические эффекты – усиление и пондеромоторное сжатие – в оптомеханической системе. Здесь желто-красная область показывает усиление, синяя область – сжатие. Слева – данные эксперимента, справа – теоретическое предсказание в отсутствие шума

Измерение энергетических характеристик ЛИ

Измерение энергии одиночных световых импульсов



Конструкция теплового приемника с термоэлектрическим преобразователем:
1 – поглощающий конус; 2 – батарея термоэлементов; 3 – компенсационный конус;
4 – теплоемкая оболочка (корпус)