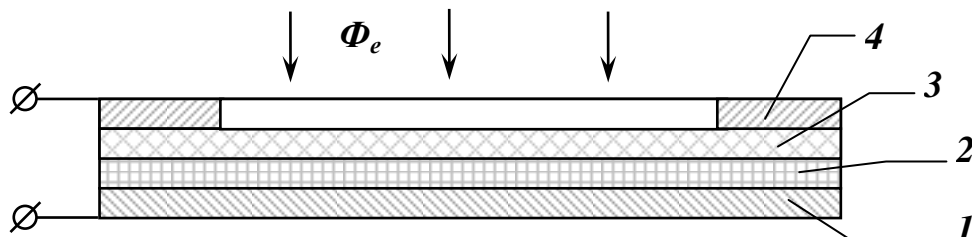


## **ГРАДУИРОВКА СЕЛЕНОВОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА ДЛЯ СВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Селеновые фотоэлементы с запирающим слоем относятся к числу наиболее распространенных полупроводниковых приборов. Принципиальное отличие фотоэлементов с запирающим слоем (вентильных фотоэлементов) от фотоэлектронных приборов, основанных на внешнем фотоэффекте, и фоторезисторов заключается в том, что они создают под действием излучения собственную электродвижущую силу. Энергия излучения в этих фотоэлементах непосредственно преобразуется в электрическую. Основную роль в этом играет запирающий слой. В селеновых фотоэлементах, схема устройства которых представлена на рис.1, этот слой образуется между областью с  $p$ -проводимостью - селеном и областью с  $n$ -проводимостью, возникающей либо в результате диффузии металлов в слой селена, либо в результате образования селенистых соединений металлов. Из области с  $n$ -проводимостью электроны, находящиеся в зоне проводимости, перемещаются, при наличии градиента их концентрации, через границу раздела и вблизи неё рекомбинируют с дырками  $p$ -области. Это приводит к образованию на границе двойного заряженного слоя с положительной компонентой в  $n$ -области и отрицательной в  $p$ -области. Возникающая при этом разность потенциалов называется контактной.



**Рис. 1.** Схема устройства селенового фотоэлемента:

- 1 - металлическая подложка;
- 2 - слой селена;
- 3 - полупрозрачный металлический электрод;
- 4 - контактное кольцо.

При облучении селенового фотоэлемента поглощение фотонов в основном происходит в  $p$ -области. Эффективно поглощенные фотоны образуют пары электрон-дырка. В режиме холостого хода электроны, генерируемые в  $p$ -области, попадают в ускоряющее для них поле и переходят в  $n$ -область, заряжая её отрицательно. А дырки остаются в  $p$ -области, которая заряжается положительно. В результате этого процесса между выводами фотоэлемента возникает разность потенциалов, которая уменьшает вероятность перехода электронов из  $n$ -области в  $p$ -область и дырок из  $p$ -области в  $n$ -область. Таким образом, электроны проходят через  $p$ - $n$ -переход в обоих направлениях и суммарный ток, созданный их движением уменьшается. В то же время поток дырок из  $p$ -области будет постепенно нарастать. Этот процесс продолжается до тех пор, пока оба потока не сравняются, и ток через  $p$ - $n$ -переход не прекратится. При этом между выводами фотоэлемента устанавливается разность потенциалов  $U_{xx}$ .

Если фотоэлемент замкнут накоротко, то во внешней цепи возникает ток неосновных носителей  $i_{кз}$ , направленный от  $p$ -области к  $n$ -области и прямо пропорциональный числу эффективно поглощенных фотонов, т.е. потоку  $\Phi_e$ , упавшему на фотоэлемент.

В промежуточном режиме, если в цепь фотоэлемента включено сопротивление нагрузки  $R_n$ , то между  $p$ - и  $n$ - областями создается некоторая разность потенциалов  $U < U_{xx}$ , а ток во внешней цепи уменьшается по сравнению с  $i_{кз}$ . В этом случае в фотоэлементе существует два потока носителей: прямой, созданный неосновными носителями, и встречный, возникающий в результате движения основных носителей, преодолевших снизившийся потенциальный барьер.

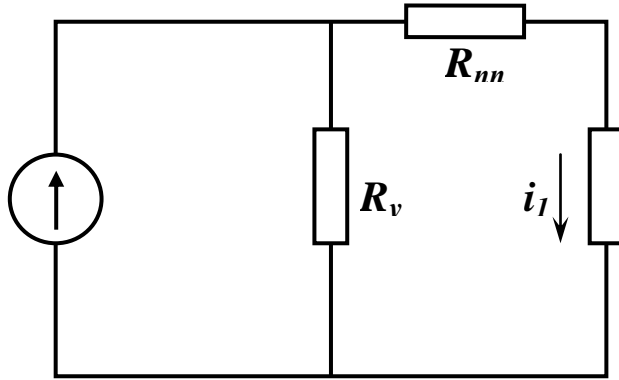


Рис.2. Эквивалентная электрическая схема селенового фотоэлемента

Эквивалентная схема селенового фотоэлемента представлена на рис.2, где фотоэлемент представлен как генератор тока с параллельно включенным внутренним сопротивлением запирающего слоя  $R_y$  (сопротивление утечки) и последовательно соединенным сопротивлением  $R_{nn}$ , учитывающим сопротивление объема полупроводника и контактов.

Анализ такой упрощенной схемы приводит к следующему выражению

для тока во внешней цепи:

$$i = \frac{K \cdot \Phi_e}{1 + (R_{nn} + R_n) R_y} ; \quad (4-1)$$

В этом выражении  $R_y = f(E)$ , поэтому зависимость  $i_l = f(E)$  является нелинейной. Если  $R_n = 0$ , то

$$i_{кз} = \frac{K \cdot \Phi_e}{\frac{R_{nn}}{R_y} + 1} ; \quad (4-2)$$

При небольших значениях  $\Phi_e$  имеем  $R_y \gg R_{nn}$ , и тогда

$$i_{кз} = K \cdot \Phi_e ; \quad (4-3)$$

С возрастанием  $\Phi_e$  внутреннее сопротивление  $R_y$  уменьшается и нелинейность световой характеристики  $i_l = f(E)$  будет возрастать, и тем сильнее, чем больше сопротивление нагрузки.

Одним из важнейших параметров селенового фотоэлемента является интегральная чувствительность  $S$  [мкА/лм], определяемая отношением тока во внешней цепи к величине падающего светового потока. Интегральная чувствительность зависит от сопротивления внешней цепи  $R_n$  и освещенности фотоэлемента  $E_v$ . Кроме того, она зависит от спектрального состава излучения. Поэтому для однозначного суждения о свойствах фотоэлемента принято определять интегральную чувствительность для режима короткого замыкания при цветовой температуре источника излучения  $T_u$  равной 2856К и  $E_v = 100$  лк.

Из-за значительного расхождения спектральных чувствительностей селенового фотоэлемента и глаза (рис.3) при точных световых измерениях излучений с различным спектральным составом необходимо исправлять спектральную чувствительность фотоэле-

мента специально рассчитанным светофильтром или применять для коррекции полученных значений поправочный коэффициент:

$$a = \frac{\int_0^{\infty} \varphi(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda \cdot \int_0^{\infty} \varphi_0(\lambda) \cdot \nu(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi(\lambda) \cdot \nu(\lambda) d\lambda \cdot \int_0^{\infty} \varphi_0(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}; \quad (4-4)$$

где  $\varphi(\lambda)$  и  $\varphi_0(\lambda)$  - спектральная плотность потока исследуемого и образцового излучения;

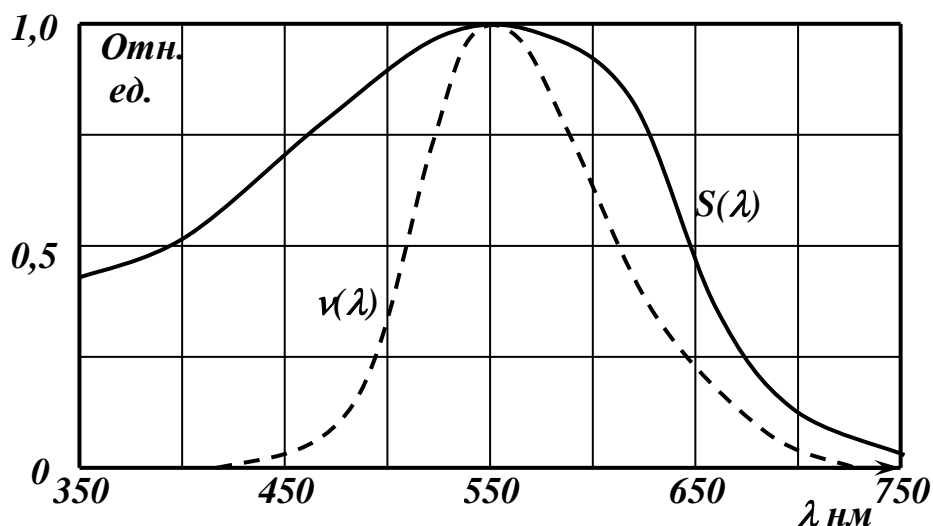


Рис.3. Относительная спектральная чувствительность фотоэлемента  $S(\lambda)$  и глаза  $\nu(\lambda)$

$S(\lambda)$  - спектральная чувствительность фотоэлемента;

$\nu(\lambda)$  - относительная спектральная световая эффективность излучения.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для исследования характеристик селенового фотоэлемента собирается на фотометрической скамье. В начале скамьи расположен осветитель с образцовой лампой, с помощью которой производится градуировка. Исследуемый фотоэлемент устанавливается на подвижной каретке, позволяющей плавно и в широких пределах изменять его освещенность. На другом конце скамьи находится осветитель с люминесцентной лампой.

При снятии характеристик фотоэлементов используются дополнительный источник э.д.с., потенциометр, микроамперметр, милливольтметр и магазин сопротивлений.

Для экспериментального определения поправочного коэффициента при измерениях освещенности от люминесцентных ламп фотоэлементом, отградуированным по лампе накаливания, используется фотометрическая головка (см. Приложение I).

### ЗАДАНИЕ

1. Рассчитать значение поправочного коэффициента при измерении освещенности от заданного источника со спектром отличающимся от спектров образцового источника (данные для расчета приведены в приложениях).

2. Рассчитать и построить кривую  $\pi(\lambda)$  светофильтра, исправляющего спектральную чувствительность фотоэлемента под чувствительность глаза.

3. Исследовать для селенового фотоэлемента зависимости  $i_{кз} = f(E_v)$ ,  $U_{xx} = f(E_v)$ , а также  $R_v = f(E_v)$ .

4. Определить интегральную чувствительность фотоэлемента  $S$  [мкА/лм] при освещенности, заданной преподавателем.

5. Снять световые характеристики фотоэлемента при различных значениях сопротивления внешней цепи (по указанию).

6. Экспериментально определить поправочный коэффициент для измерения освещенности от люминесцентной лампы по градуировке, выполненной в п.4 и сравнить со значением, рассчитанным в п.1.

7. Ознакомиться с серийным фотоэлектрическим люксметром.

### УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Зависимости  $i_{кз} = f(E_v)$  и  $U_{xx} = f(E_v)$  снимаются по схемам, показанным на рис.4а и 4б. В первом случае при различных значениях освещенности фотоэлемента

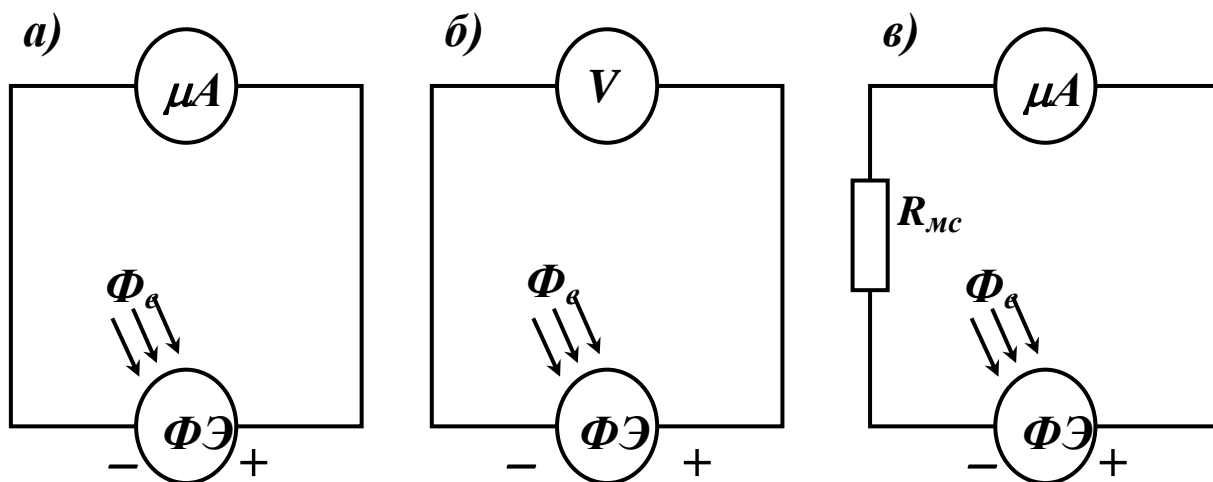


Рис. 4. Схемы включения фотоэлемента в различных режимах:

а) короткого замыкания; б) холостого хода; в) измерения  $i_1 = f(E_v)$ .

микроамперметром измеряется ток  $i_{кз}$ . Во втором случае напряжение  $U_{xx}$  измеряется милливольтметром.

При этом удобнее измерить сначала значения  $i_{кз}$  и  $U_{xx}$  при различных расстояниях  $\ell_x$  между фотоэлементом и эталонной лампой с известной силой света  $J_{эм}$ , а затем определить соответствующие этим расстояниям значения освещенностей по закону обратных квадратов:

$$E_v = \frac{J_{эм}}{\ell^2};$$

Для построения зависимости  $R_y = f(E_v)$  значения внутреннего сопротивления фотоэлементов находятся из соотношения:

$$R_y = \frac{U_{xx}}{i_{кз}};$$

2. Измерение световых характеристик фотоэлемента производится по схеме, изображенной на рис.6 с включением в цепь фотоэлемента магазина сопротивлений.

3. Для определения поправочного коэффициента (п.5 задания) одновременно включается люминесцентная лампа и лампа накаливания. Между ними, на подвижной каретке устанавливается визуальная фотометрическая головка. Находится такое положение фотометрической головки на скамье, когда освещенности от сравниваемых источников будут равны. Фиксируя каретку в этом положении, заменяют головку фотоэлементом, и, поворачивая его на  $180^\circ$  замеряют поочередно показания гальванометра при освеще-

нии фотоэлемента каждой лампы. Поправочный коэффициент определяется отношением этих показаний.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что следует понимать под термином "градуировка прибора"?
2. В каких единицах измеряется освещенность?
3. Дать определение спектральной чувствительности приемника света.
4. Пояснить назначение корректирующего светофильтра.
5. В чем заключается физический принцип работы селенового фотоэлемента?
6. Что такое "световая характеристика приемника света"?
7. Почему и когда световая характеристика селенового фотоэлемента не линейна?
8. Как осуществляется градуировка фотоэлемента для работы в качестве люксметра?
9. Почему и когда результат измерения освещенности зависит от спектрального состава освещения?
10. Чему равна освещенность в плоскости фотоэлемента, если при частично закрытом фотоэлементе на 75 % его поверхности прибор показывает значения  $100 \text{ лм/м}^2$  ?
11. При каких условиях можно проводить измерения освещенности без корректирующего светофильтра?

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. СОБОЛЕВА Н.А., БЕРКОВСКИЙ А.Г., ЧЕЧИК И.О. и др. Фотоэлектрические приборы.-М.; "Наука", 1965. - 624 с.
2. СОБОЛЕВА Н.А., МЕЛАМИД А.Е., Фотоэлектронные приборы.- М.: "Высшая школа", 1974. - 488 с.

### **ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

*Относительная спектральная световая эффективность излучения.  $\psi(\lambda)$  и относительная спектральная чувствительность селенового фотоэлемента  $S(\lambda)$ .*

$\lambda, \text{нм}$	$\psi(\lambda)$	$S(\lambda)$	$\lambda, \text{нм}$	$\psi(\lambda)$	$S(\lambda)$
360	0,0000	0,42	560	0,995	1,00
370	0,0000	0,45	570	0,952	0,995
380	0,0000	0,48	580	0,870	0,99
390	0,0001	0,31	590	0,757	0,96
400	0,00014	0,53	600	0,631	0,93
410	0,0012	0,565	610	0,503	0,95
420	0,0040	0,60	620	0,381	0,78
430	0,0116	0,635	630	0,265	0,71
440	0,023	0,67	640	0,175	0,65
450	0,038	0,705	650	0,107	0,51
460	0,060	0,74	660	0,061	0,37
470	0,091	0,78	670	0,032	0,27
480	0,139	0,82	680	0,017	0,17
490	0,208	0,86	690	0,0082	0,10
500	0,323	0,89	700	0,0041	0,03
510	0,503	0,91	710	0,0021	0,02
520	0,710	0,93	720	0,00105	0,01
530	0,862	0,95	730	0,00052	0,005
540	0,954	0,97	740	0,00025	0,000
550	0,995	0,985	750	0,00012	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

## Спектральные характеристики источников света

$\lambda$	Источники излучения						
	ЛДЦ	ОЛД	ЛХЕ	ЛБ	ЛТБ	Источник типа "А"	Лампа Накаливания
<i>нм</i>	<i>Сплошной спектр (отн.ед./нм)</i>						
360	17,0	5,0	2,6	2,1	3,0		
380	30,8	13,7	7,0	5,2	5,2	9,79	3,11
400	9,0	28,7	12,0	7,5	5,7	14,71	4,62
420	46,2	52,5	19,5	12,5	6,8	21,0	7,1
440	63,4	75,0	27,4	17,0	8,8	28,7	9,3
460	84,3	92,0	34,4	21,2	11,0	37,82	10,9
480	96,5	100,0	37,0	22,5	12,8	48,25	15,2
500	99,5	94,0	36,0	21,8	13,5	59,86	18,8
520	94,0	85,0	35,7	23,4	16,3	72,50	22,8
540	91,0	95,2	55,5	40,5	30,0	85,95	27,2
560	93,4	95,2	85,5	77,2	70,5	100,00	31,7
580	95,7	95,0	99,2	100,0	99,0	114,14	36,66
600	94,5	82,0	88,0	89,6	92,2	129,04	41,0
620	86,7	56,0	58,8	88,6	66,5	143,62	45,4
640	73,3	34,3	34,5	33,4	41,2	157,98	50,0
660	58,8	21,0	18,6	17,6	24,7	171,96	52,4
680	40,4	13,5	10,8	9,7	14,8	185,43	58,5
700	30,6	9,5	6,3	5,4	8,2	198,26	62,5
720	20,5	7,0	4,0	3,4	5,5	210,36	66,5
740	13,0	5,0	2,0	2,3	3,5	221,66	66,0
<i>Линии (отн.ед.)</i>							
365/366,3	486	315	249	222	223		
404,7/407,8	731	551	415	350	380		
435,8	2075	590	1190	927	1110		
546,1	1100	790	613	455	560		
577/5799,0	312	242	182	134	154		

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### ВИЗУАЛЬНАЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ГОЛОВКА

Визуальная фотометрическая головка (ВФГ) является принадлежностью линейного фотометра (фотометрической скамьи) при выполнении измерений зрительными методами. Основная задача, которая решается с помощью ВФГ - это определение условий (например, расстояний) фотометрического равновесия между двумя источниками света.

ВФГ устанавливается на одной из кареток фотометрической скамьи между сравниваемыми источниками света. Эти источники каждый со своей стороны (см.рис.1) освещают находящуюся в корпусе головки (1) приёмную испытательную пластину (2), имеющую с обеих сторон белое матовое покрытие. Свет, отражённый поверхностями пластины, направляется призмами полного внутреннего отражения (3) через фотометрический кубик (4) в окулярную трубу головки (5).

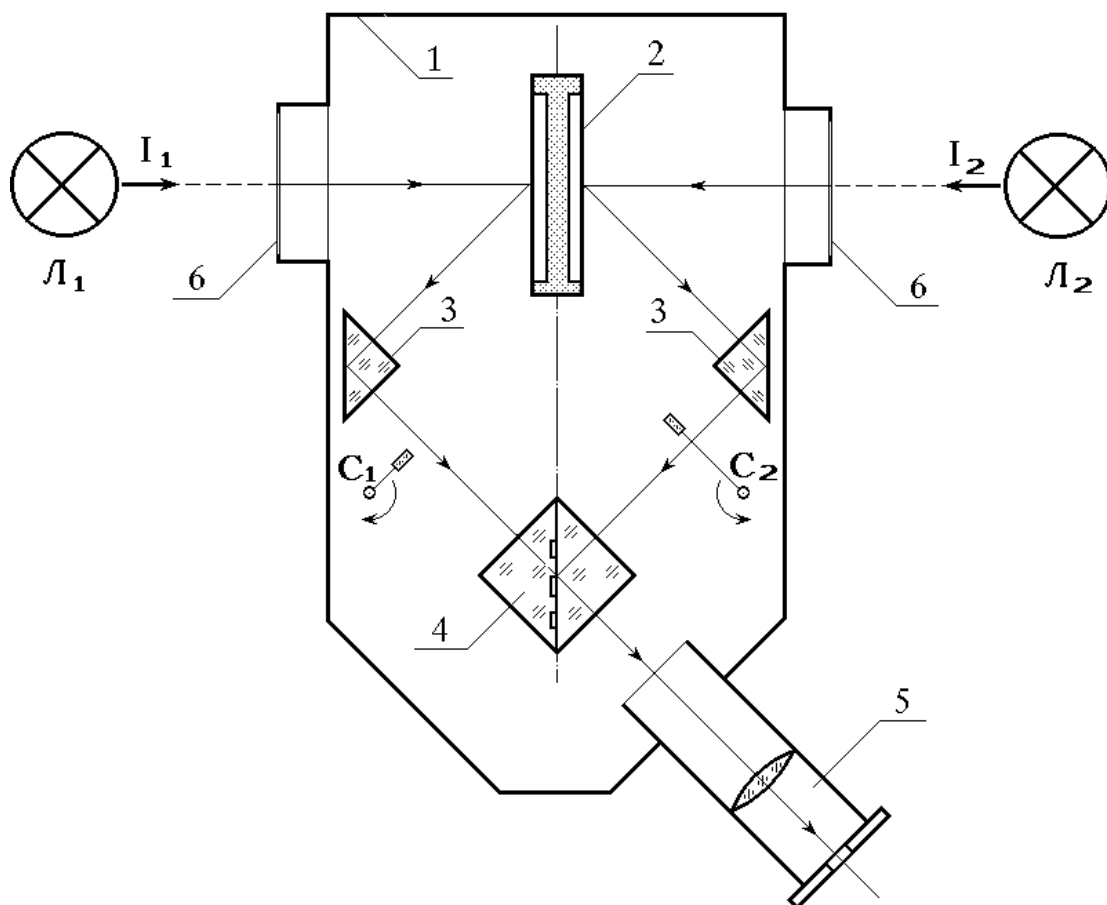
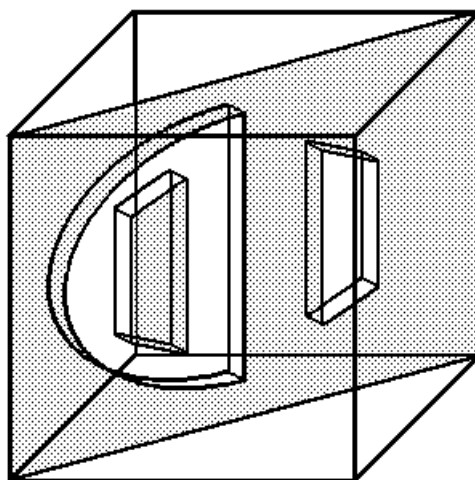
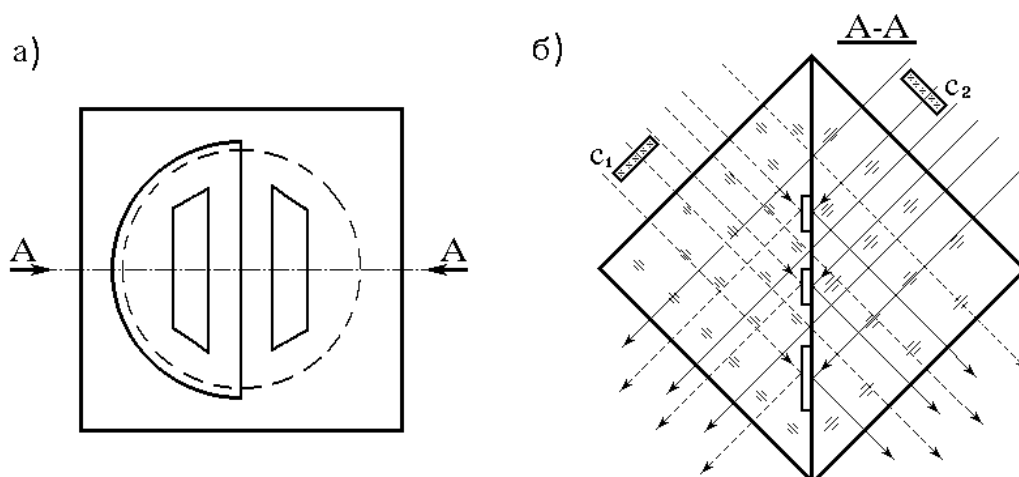


Рис. 1. Оптическая схема визуальной фотометрической головки.

Разделительный кубик Люммера-Бродхуна, применяемый в фотометрической головке, считается одним из наилучших устройств для создания полей сравнения. Кубик представляется собой две склеенные канадским бальзамом призмы (рис.2), так, чтобы в местах склеивания (они показаны штриховкой) существовал оптический контакт. На склеиваемой грани одной из призм имеются выемки сложной формы (не заштрихованная часть диагональной плоскости), дно которых отполировано.



*Рис. 2. Разделительный кубик Люммера-Бродхуна.*



*Рис. 3. Кубик Люммера-Бродхуна:  
а) вид со стороны окуляра;  
б) ход лучей в кубике в плоскости A-A.*

На рис.3а показаны вид кубика со стороны окулярной трубки. В поле зрения наблюдателя попадает область ограниченная штриховой линией. Таким образом в левой части поля зрения находится большая выемка с трапециидальным выступом в центре, который имеет оптический контакт с гранью второй призмы, а в правой части, наоборот, основное поле зрения образовано склеенными поверхностями с трапециидальной выемкой в центре.

Ход лучей в кубике Люммера-Бродхуна в плоскости среднего сечения A-A представлен на рис.3б. При этом лучи света со стороны грани **I** проходят прямо в окуляр, если они попадают между выемками на область оптического контакта, или испытывают полное внутреннее отражение, если попадают на дно выемки, и в дальнейшем поглощаются стенками корпуса головки. И наоборот, из лучей, идущих со стороны грани **II**, в окуляр проходят те, которые, попав на выемку испытывают полное внутреннее отражение, а те, которые попадают между выемками, проходят прямо и теряются на зачернённых стенках. Следовательно, в окуляре будут видны участки, яркость которых будет определяться яркостями обеих поверхностей испытательной пластины, причём левое основное поле и трапеция на правой половине соответствуют яркости пластины освещаемой источником



$L_2$ , а правое основное поле и трапеция на левой половине соответствует яркости источника  $L_1$ . Соответственно яркости полей сравнения будут равны:

$$L_1 = K_1 \frac{\rho_1 \cdot E_1}{\pi} = \frac{K_1 \cdot \rho_1}{\pi} \cdot \frac{J_1}{l_1^2}; \quad (\text{П-1})$$

$$L_2 = K_2 \frac{\rho_2 \cdot E_2}{\pi} = \frac{K_2 \cdot \rho_2}{\pi} \cdot \frac{J_2}{l_2^2}; \quad (\text{П-2})$$

где  $K_1, K_2$  - коэффициенты пропускания соответствующих оптических каналов;

$\rho_1, \rho_2$  - коэффициенты отражения сторон испытательной пластины;

$E_1, E_2$  - освещенности сторон испытательных пластин;

$l_1, l_2$  - расстояния от испытательной пластины до источников света с силой  $J_1$  и  $J_2$ .

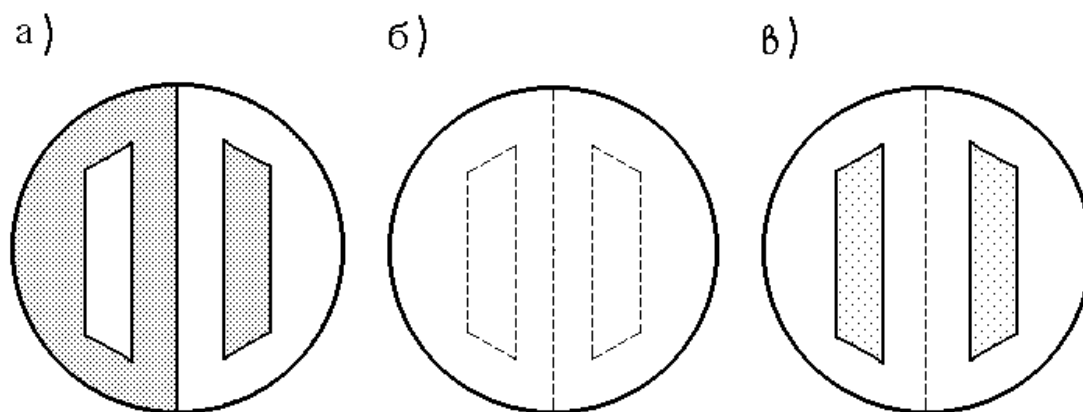
Конструктивно фотометрическая головка изготовлена так, чтобы потери света в обоих оптических каналах и отражение стороны испытательной пластины были как можно более близкими по величине, т.е.  $K_1 \approx K_2$  и  $\rho_1 \approx \rho_2$ . В этом случае при выравнивании яркостей полей сравнения, когда  $L_1 = L_2$ , можно считать, что  $E_1 \approx E_2$ . Тогда по закону квадратов расстояний следует, что

$$\frac{J_1}{l_1^2} \approx \frac{J_2}{l_2^2} \quad \text{или} \quad \frac{J_1}{J_2} \approx \frac{l_1^2}{l_2^2} \quad (\text{П-3})$$

Таким образом, об отношении сил света сравниваемых источников света можно судить по отношению квадратов расстояний, при которых устанавливается фотометрическое равновесие.

На рисунке 4а показана картина, визуально наблюдаемая в окуляр, когда яркости сторон испытательной пластины различны. Перемещая каретку с ВФГ вдоль скамьи можно добиться такого ее положения, когда яркости полей сравнения по мнению наблюдателя станут одинаковыми.

Очевидно, что определенную роль при этом играют субъективные особенности зрения наблюдателя при определении момента, когда яркости полей сравнения становятся равными.



**Рис. 4.** Вид полей сравнения в кубике Люммера-Бродхуна:

а) яркости испытательных пластин различны;

б) яркости испытательных пластин выравнены;

в) яркости испытательных пластин выравнены по методу контрастных полей.

Для получения точности может быть применен метод контрастных полей. На нижней крышке корпуса ВФГ имеются две рукоятки, вращением которых в оптические каналы

помещаются плоскопараллельные прозрачные пластины  $C_1$  и  $C_2$  так, как показано на рисунках 1 и 3б. При этом они помещаются на пути света, проходящего через участки трапеций. Около 8% света теряется при отражении от этих пластин. Вследствие этого при фотометрическом равновесии, когда яркость обеих сторон приемной пластины одинакова, видимое в окуляр поле имеет вид, изображенный на рисунке 4в: на фоне равномерной яркости видны несколько более темные, чем фон, трапеции. Таким образом в полях сравнения создания одинаковый контраст, что дает возможность произвести измерения с ошибкой не более 0,25%.