Видеотехника

Информация

- От лат. ***Informatio*** – разъяснение, изложение, осведомление.
- ***В теории информации*** – уменьшаемая неопределенность события в результате получения сведений
- ***Теория информации*** устанавливает связь между количеством информации, содержащейся в сообщении и необходимой длиной кода, способного передать это сообщение с заданной надежностью при заданном уровне помех

Источники видеосообщений

- ***Излучения –*** эл/м колебания испускаемые, пропущенные или отраженные объектом и окружающей средой;
- Восприятие излучений глазом характеризуется количественными (интенсивностью, яркостью, освещенностью) и качественными (цветовым тоном, насыщенностью) показателями

Получатель видеосообщения

- Человек (наблюдатель) – свойства глаза (и мозга) которого определяют форму представления видеосообщения
- Специальные технические (компьютерные) системы, в которых форма представления видеосообщения может существенно отличаться от воспринимаемой человеческим глазом

Изображение

- ***Монохромное*** - двумерное распределение освещенности ***E(x,y)*** в плоскости светочувствительной поверхности датчика изображения (преобразователя свет-сигнал);
- ***Цветное*** - двумерное распределение яркости и цветности ***{L(x,y); C(x,y)}*** в плоскости дисплея – преобразователя сигнал-свет

Видеосистемы виртуальной реальности

- Компьютерный синтез - 2D и 3D изображений
- Стереоскопические и многоракурсные системы синтеза объемных изображений
- Оптико-механические и голографические системы синтеза объемных 3D моделей

Канал передачи

- Среда передачи (радиоэфир, проводные системы передачи)
- Виды информационных сигналов (Оптические, электрические)
- Формы представления сигналов (Аналоговая, цифровая)

Излучение – источник информации

Лучистая энергия

- Источник информации об изображении
- Характеризуется энергетическими величинами и единицами
- Связана со светотехническими величинами законами восприятия лучистой энергии человеческим глазом
- Оценивается следующей группой объективных параметров:

Лучистая энергия

W - лучистая энергия – основная энергетическая величина,

- единица измерения – Джоуль (Дж);

Энергетический световой поток

$$P = \frac{W}{t}, \quad (1.1)$$

P - лучистый поток (Вт=Дж/с)

W - лучистая энергия (Джоуль)

t - время (с)

Энергетическая сила света

$$I_Э = \frac{P}{\Omega}, \quad (1.2)$$

$I_Э$ - сила излучения (Вт/ср)

P - мощность лучистого потока (Вт)

Ω - угол, в котором сконцентрировано излучение (стереорадиан)

Энергетическая светимость

$$Мэ = \frac{P}{S}, \quad (1.3)$$

$Мэ$ - плотность потока излучения (Вт/м²)

P - мощность лучистого потока (Вт)

S - площадь (м²)

Энергетическая освещенность

$$Eэ = \frac{P}{S}, \quad (1.4)$$

$Eэ$ - плотность потока облучения **(**Вт/м**²)**

P - мощность лучистого потока (Вт)

S - площадь (м²)

Энергетическая яркость

$$L_{э\varphi} = \frac{I_{э\varphi}}{S \cos \varphi}, \quad (1.5)$$

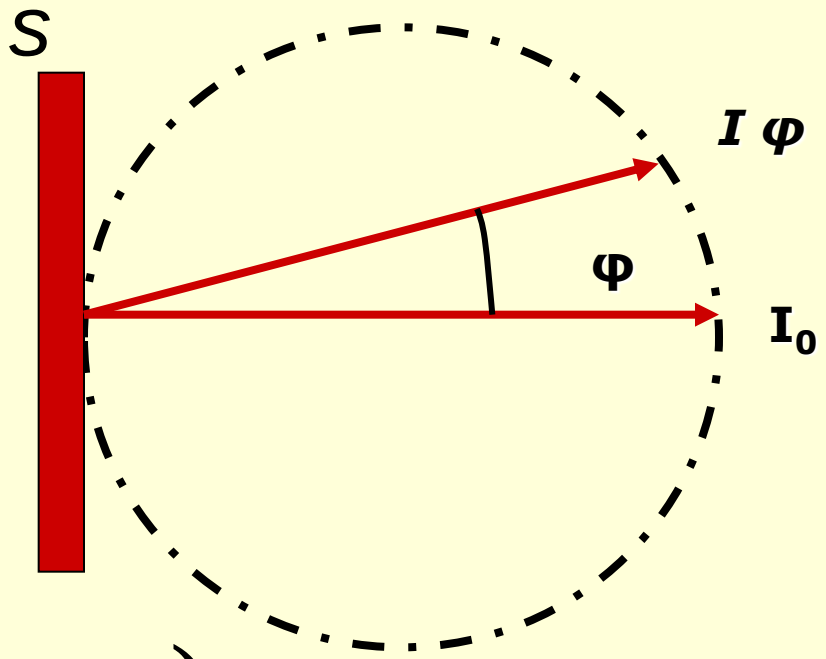
$L_э$ - Энергетическая яркость, «лучистость» (Вт/ср • м²)

$I_{э\varphi}$ - Сила излучения (Вт/ср)

S - площадь (м²)

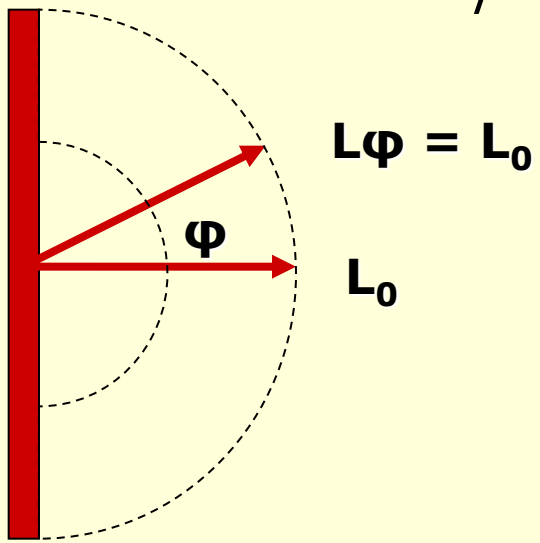
Распределение Ламберта (а) и равнояркая поверхность (b), рис.1.1

$$I\varphi = I_0 \cos\varphi$$



a)

$$L\varphi = \frac{I\varphi}{S\cos\varphi},$$



b)

Количество облучения

$$Нэ = Еэ \bullet t, \quad (1.6)$$

$Нэ$ - Количество облучения **(Дж/м²)**

$Еэ$ - Плотность облучения (Вт/ср)

t - время (с)

Частотный спектр э/м волн

- Условно, можно разделить на радио-диапазон (до 300ГГц), оптический диапазон (выше 300ГГц) и диапазон жестких (в том числе – космических) излучений (выше 10000ГГц)
- Человеческий глаз воспринимает в виде света только одну октаву э/м волн, в диапазоне (3947-7895)ГГц

Диапазон частот и длин волн э/м колебаний светового диапазона

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} = 3948 ГГц$$

$$f_{\max} = 0{,}007895 \bullet 10^{15} = 7895 ГГц$$

$$f_{\min} = 0{,}003947 \bullet 10^{15} = 3947 ГГц$$

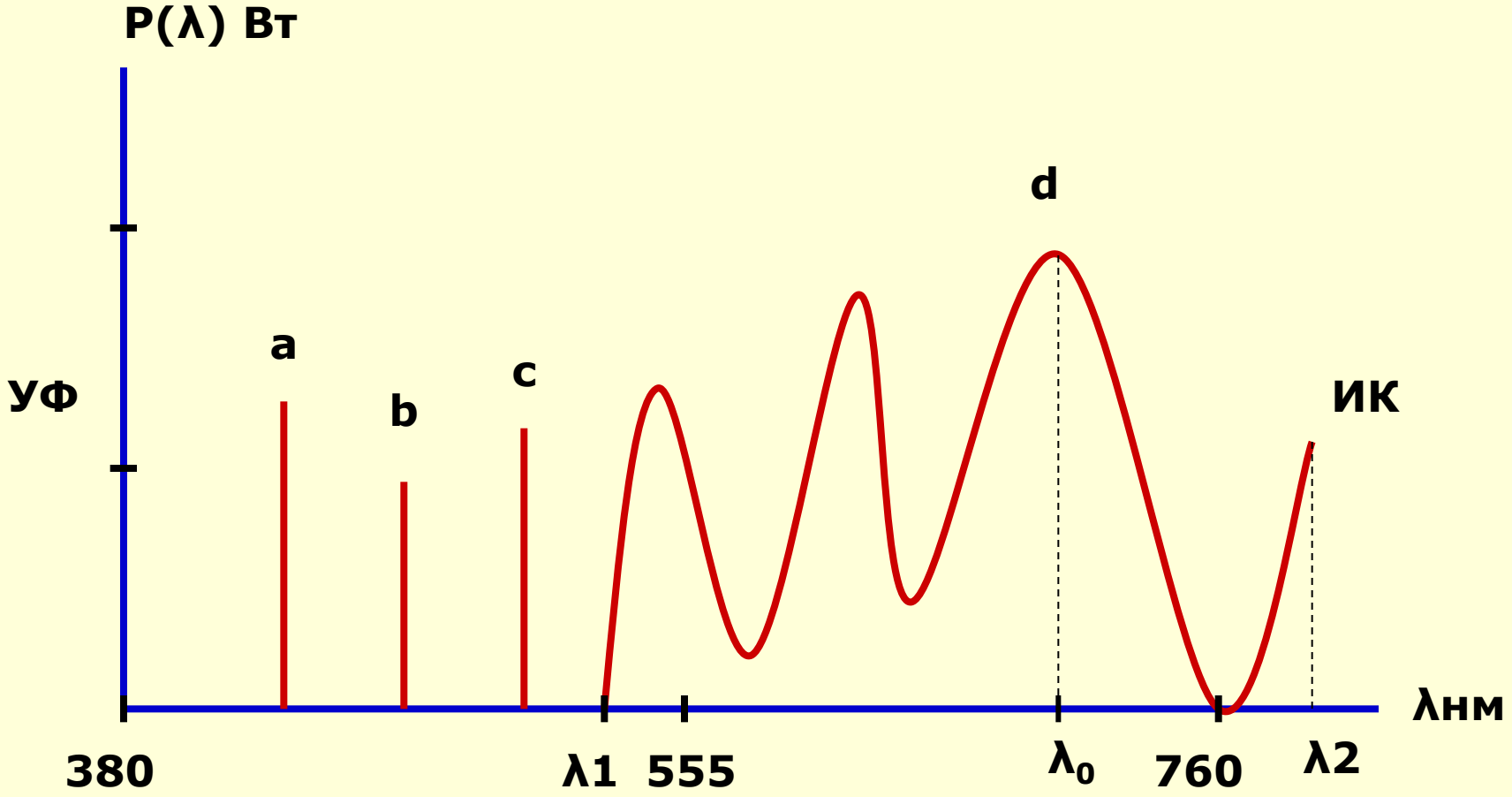
$$C = 3 \bullet 10^{8} м/с, \quad и \quad так \quad как \quad \lambda = \frac{C}{f}, (1.7)$$

$$\lambda_{\min} = 3 \bullet 10^{8} / f_{\max} = 380 нм$$

$$\lambda_{\max} = 3 \bullet 10^{8} / f_{\min} = 760 нм$$

$$\Delta\lambda = 380 нм$$

Монохроматические и сложные (по составу) излучения, рис.1.2



Закон Вина для АЧТ

$$\lambda_0 = \frac{2896}{T}, \quad (1.8)$$

Спектральная плотность мощности

$$\frac{P(\lambda)}{d\lambda} \quad (Вт / нм), \quad (1.9)$$

Мощность источника освещения

$$P = a_1 \int_{\lambda 2}^{\lambda 1} P(\lambda) d\lambda \ (Bm), (1.10)$$

Спектральный коэффициент отражения объекта

$$\rho_o(\lambda) = \frac{P_{отр}(\lambda)}{P_{пад}(\lambda)}, (1.11)$$

Спектральный коэффициент пропускания оптического фильтра

$$\tau(\lambda) = \frac{P_{пр}(\lambda)}{P_{пад}(\lambda)}, (1.12)$$

Психофизиология восприятия видео

Восприятие света глазом (фотометрия) и светотехнические величины

Свет

- Свет – электромагнитные колебания в диапазоне длин волн, λ1 – λ2, около одной октавы

$$\lambda_1 = 380 нм; \quad \lambda_2 = 760 нм;$$

$$\lambda = C / f$$

- $$C = 3 \bullet 10^8 (м / с)$$

$$f_1 = 3 \bullet 10^8 / 380 \bullet 10^{-9} = 7{,}8947368 \bullet 10^{14} Гц$$

$$f_2 = 3 \bullet 10^8 / 760 \bullet 10^{-9} = 3{,}9473684 \bullet 10^{14} Гц$$

Световое излучение

- Под световым излучением понимается лучистый поток энергии, ***оцениваемый по его восприятию человеческим глазом***
- Различают количественные и качественные характеристики светового излучения
- Соответственно, существует два научных направления: фотометрия и колориметрия

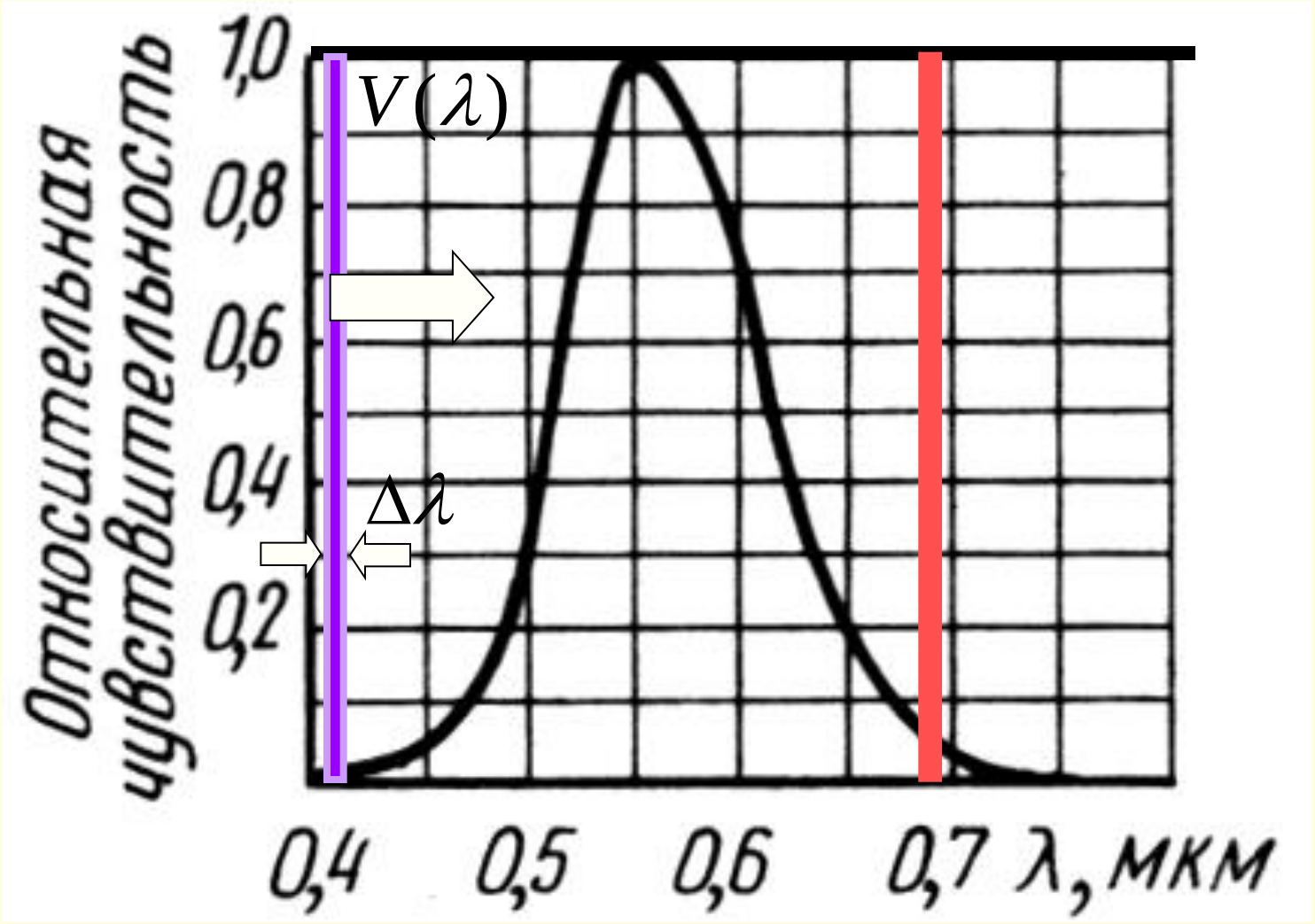
$V(\lambda)$ - Спектральная чувствительность глаза (кривая видности) (Вт/лм)

$V(\lambda)$ – экспериментальная кривая, полученная в результате субъективно – статистических экспертиз

Кривая видности

- Кривая видности – это отклик нашего зрения на монохроматический (шириной $\Delta\lambda$) лучистый поток равной мощности!
- В условиях низкой освещенности максимум кривой $V(\lambda)$сдвигается вправо на 50-100нм (Сумеречное зрение);
- Благодаря тому, что каждая монохроматическая составляющая отображается своим уровнем яркости (градацией), по черно-белой репродукции мы узнаем оригинал

Кривая относительной видности. Восприятие яркости, рис.2.1.



Кривая видности

- ***Кривая видности*** *задает форму характеристики спектральной чувствительности* ***черно-белой ТВ*** *камеры, создающей* ***психологически достоверную*** *репродукцию.*
- *Кривая видности обычно задается табличным способом, а не аналитическим*

Энергетическая сила света

$$I_Э = \frac{P}{\Omega}, \quad (1.2)$$

$I_Э$ - сила излучения (Вт/ср)

P - мощность лучистого потока (Вт)

Ω - угол, в котором сконцентрировано излучение (стереорадиан)

Сила света I

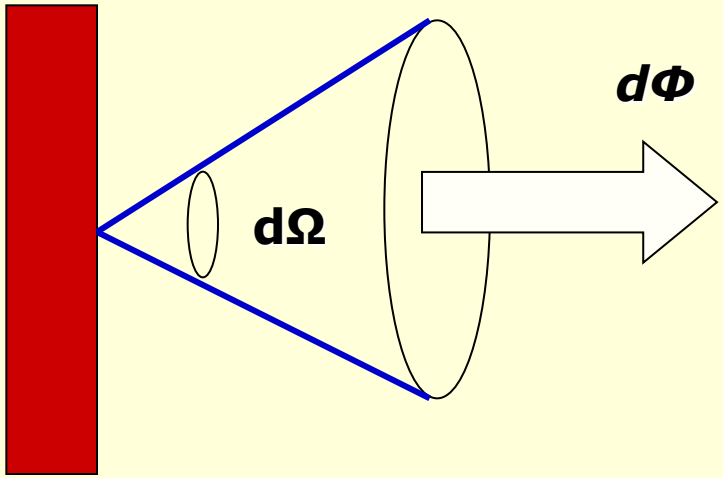
I - Основная светотехническая величина

- Единица измерения – канделла (кд)
- Свеча = кд – устаревшее название

I - Пространственная плотность светового потока

$$I = d\Phi / d\Omega, \quad (2.1)$$

Световой поток ***dΦ*** в угле ***dΩ,*** равном одному стереорадиану, рис.2.2



Световой поток,

$$\Phi = I \bullet \Omega \qquad (2.2)$$

Φ - Световой поток (лм) = 1кд $\bullet$1ср

I - Сила света (кд)

Ω - Угол (ср)

Световая энергия

$$Q = \Phi \cdot t \quad (лм \cdot c), (2.3)$$

$$\Phi - (лм)$$

$$t - (c)$$

$$Q = \int_{t1}^{t2} \Phi_t dt, \quad (2.4)$$

Энергетический световой поток

$$P = \frac{W}{t}, \quad (1.1)$$

Светимость

$$M = d\Phi / dS \quad (лм / м^2), \quad (2.5)$$

$$\Phi - световой \quad поток \quad (лм)$$

$$S - площадь \quad (м^2)$$

Характеризует поверхностную плотность излучаемого светового потока

Освещенность

$$E = d\Phi / dS \quad (лм / м^2), \quad (2.6)$$

$$\Phi - световой \quad поток \quad (лм)$$

$$S - площадь \quad (м^2)$$

Характеризует поверхностную плотность светового потока на облучаемой поверхности

Яркость

$L(x, y, z, t) - яркость(\bullet)\ изображения,$

$где:$

$x, y, z - декартовы\ координаты(\bullet);$

$t - время$

Яркость

$$L\varphi = \frac{dI\varphi}{dS\cos\varphi} \quad (кд/м^2), \quad (2.7)$$

$I\varphi - сила \quad света \quad (кд)$

$S - площадь \quad (м^2)$

$\varphi - угол \quad между \quad нормалью \quad и \quad лучом$

Яркость

- *Если распределение силы света по поверхности источника подчиняется закону Ламберта:*

$$I_\varphi = I_0 \cos\varphi, \quad (2.8)$$

то наблюдаемая яркость

не зависит от угла наблюдения

$$L_\varphi = \frac{I_\varphi}{S\cos\varphi} = \frac{I_0\cos\varphi}{S\cos\varphi} = \frac{I_0}{S} = L_0, \quad (2.9)$$

Количество освещения (экспозиция)

$$H = \int_{t1}^{t2} E_t \cdot dt \quad (лк \cdot с), \quad (2.10)$$

$$E - освещенность \quad (лк)$$

$$t - время \quad (с)$$

Характеризуется количеством световой энергии, падающей на единицу площади освещаемой поверхности за интервал времени t_2-t_1

***Падающий* световой поток (лм)**

$$\Phi = a_2 \int_{\lambda 2}^{\lambda 1} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2.11)$$

$$a_2 = V_0 = 683 \ лм / Вт$$

Световой поток отраженный объектом, (лм)

$$Фо = a_2 \int_{\lambda 2}^{\lambda 1} V(\lambda)\rho_o(\lambda)P(\lambda)d\lambda, \quad (2.12)$$

$$\lambda_{\max} = 555\,(нм)$$

$$a_2 = V_0 = 683\ лм/Вт$$

Свойства зрения

Максимальный контраст

- Диапазон изменения яркости объектов *Lo* или их изображений *Lu*, (от минимальной - *L min* , до максимальной - *L max*) характеризуется ***максимальным контрастом*** *Kmax*

$$K_{\max} = L_{\max} / L_{\min} \qquad (2.13)$$

Светлота – субъективное ощущение яркости

- В пределах этого диапазона ***ощущение изменения яркости*** (светлоты, *Св*) пропорционально ***не*** абсолютному приращению яркости,

$$Ссв \neq \Delta L = |L_1 - L_2| \quad (2.14),$$

Светлота – субъективное ощущение яркости

- а логарифму ее относительного изменения:

$$Ссв = a \ln\left(\Delta L / L_2\right) \quad (2.15).$$

Контрастная различительная способность глаза конечна

- Глаз не способен обнаружить сколь угодно малые приращения яркости.
- ***Контрастная различительная способность глаза конечна***, что приводит к дискретности разрешения градаций яркости.

Контрастная различительная способность глаза конечна

- Минимальная величина ***контрастной различительной способности глаза*** ограничивается квантовыми флуктуациями света и собственными шумами зрительной системы.
- Минимальное (пороговое) значение яркости светового пятна ***L min,*** обнаруживаемое глазом на черном фоне (при темновой адаптации), называется ***абсолютным порогом световой чувствительности***

Пороговый контраст

- На практике глазу чаще приходится различать отдельные детали на некотором фоне с яркостью ***Lф.***
- При этом глаз реагирует на относительное приращение яркости:

$$(L - L_ф) / L_ф = \Delta L / L_ф \quad (2.16)$$

Контраст и контрастная чувствительность

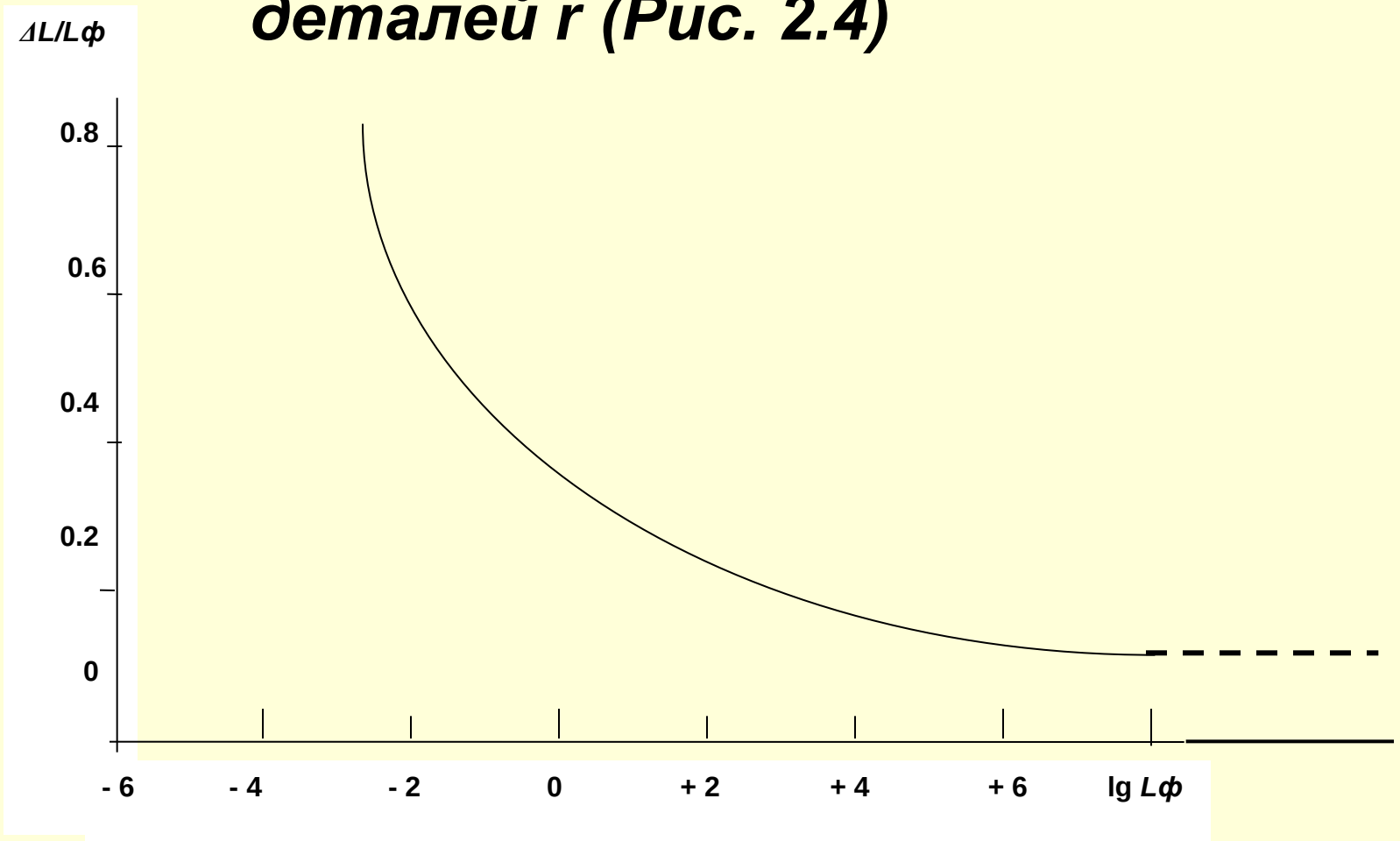
$$K = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}, - контраст$$

$$\delta = \frac{\Delta L_{\min}}{L_{ф}}, - пороговый\ контраст$$

Пороговый контраст

- Отношение (2.16) называют ***пороговым контрастом.***
- ***Пороговый контраст зависит от яркости фона, угловых размеров детали и фона, наличия/отсутствия внешней засветки, адаптации наблюдателя, а также от других параметров и условий наблюдения.***
- ***Зависимость порогового контраста от изменения яркости фона и размера деталей r показана на рис. 2.4***

Зависимость порогового контраста от изменения яркости фона и размера деталей r (Рис. 2.4)



Контрастная чувствительность

- В рабочем диапазоне изменения яркости фона (яркости адаптации) ***Lф*** в первом приближении можно считать, что:

$$(\Delta L / L\phi)_{пор} = \delta = 0{,}02...0{,}05 \approx const$$

Число полутонов (градаций яркости)

- При заданном контрасте зритель может воспринять вполне определенное количество ступеней изменений яркости — *полутонов,* т.е. *градаций яркости*
- *Первая различимая ступень яркости:*

$$L_1 = L'_{\min} + \delta L'_{\min} = (1+\delta) L'_{\min} \quad (2.17)$$

Число полутонов (градаций яркости)

- Следующая ступень яркости:

$$L_2 = L_1 + \delta L_1 = (1+\delta)^2 L'_{\min} \quad (2.18)$$

- Последняя ступень яркости:

$$L'_{\max} = (1+\delta)^m L'_{\min} \quad (2.19)$$

Число полутонов (градаций яркости)

Число ступеней *m* или число градаций *A:*

$$A = \left(\ln \frac{L'_{\max}}{L'_{\min}}\right) \Big/ \ln(1+\delta) \quad (2.20)$$

Число полутонов (градаций яркости)

- Разлагая $\ln(1+\delta)$

  в ряд и ограничиваясь первым членом этого ряда вследствие малости σ, получим:

$$A \approx \frac{\ln(L'_{\max} / L'_{\min})}{\delta} \approx \frac{2{,}3}{\delta} \lg \frac{L'_{\max}}{L'_{\min}} \quad (2.21)$$

Пример

- Полагая, что максимальный контраст, ограничиваемый глазом, *Kmax*
- *Kmax* = $L_{\max} / L_{\min} = 100$

δ = 0,05, получим, что максимальное число градаций, которое глаз будет различать при данных условиях,

$$A \approx 92.$$

Средняя яркость

- Средняя яркость, соответствующая наилучшему восприятию, зависит от условий наблюдения, свойств зрения и от содержания изображений.
- Практикой установлено, что средняя яркость

$$L_{\text{из}\max} \approx 30$$

кд/м² вполне достаточна для наблюдения изображения и рассматривания его деталей без особого утоления зрения. При этом максимальная яркость белых деталей изображения может достигать 300 кд/м².

Адаптация

- Яркость природных объектов может изменяться в 10^5 и более раз.
- Зрительная система сужает диапазон освещенностей на сетчатке благодаря ***адаптации***
- ***Адаптация*** - регулировка освещенности сетчатки путем непроизвольного изменения диаметра зрачка (быстрая адаптация) и выработки глазного пурпура — нейтрального поглощающего фильтра на поверхности сетчатки (медленная — ***инерционная адаптация).***

Максимальная яркость природных объектов

$$\frac{L_{\max}}{L_{\min}} = 10^{11}...10^{12}$$

$$L, \quad \Delta L, \quad L_{\phi}$$

При этом мгновенные значения яркости, диапазон изменения яркостей объекта и фона могут меняться в широких пределах

На экране дисплея

$$\Delta L_{\min} = \left| L_1 - L_2 \right| = \Delta L_{пор}, \quad (2.22)$$

$$\Delta L_{пор} = \left| L_2 - L_1 \right|$$

$$L_2 = L_1 + \Delta L_{пор},$$

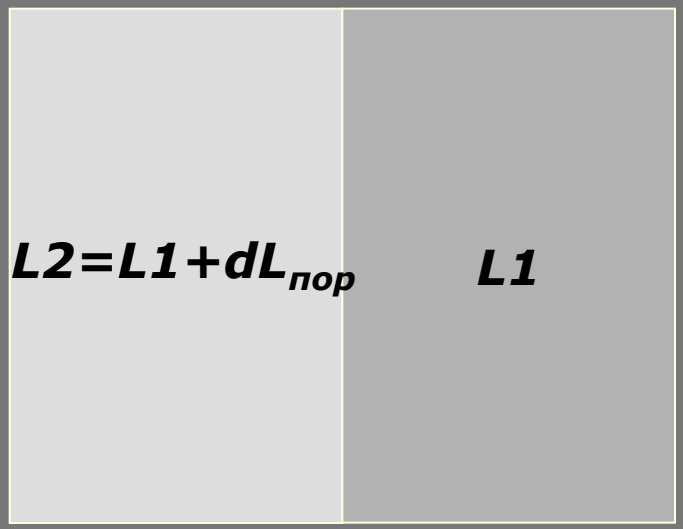
$$\frac{\Delta L_{пор}}{L_{ср}} = \delta, \text{ где:}$$

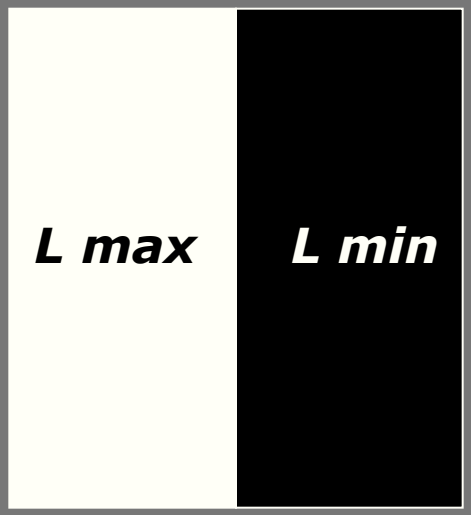
$$L_{ср} = \frac{L_1 + L_2}{2} = L_{ф}, \quad (2.23);$$

δ – дифференциальный порог

К определению порогового контраста на экране дисплея, рис.2.5

- *L ср = L ф*





Контрастная чувствительность

$$\delta = \frac{L_{ср}}{dL_{пор}}, \quad (2.24);$$

Характеризует способность глаза обнаруживать различия между яркостями смежных областей изображения

Закон Вебера - Фехнера

- Приращение зрительного ощущения пропорционально относительному изменению яркости дисплея

$$dC\,св = \xi \frac{dL}{L}, (2.25);$$

- После интегрирования:

$$C\,св = \xi \lg L + C_0, (2.26)$$

Закон Вебера - Фехнера

- Таким образом, зрительное ощущение приращения яркости фрагмента сюжета пропорционально логарифму яркости экрана дисплея
- Выбрав в качестве единицы зрительного ощущения пороговую градацию, можно оценить число одновременно различаемых градаций яркости в изображении m_L при:

$$dC\,св_{\,пор} = \delta \approx Const,$$

Ступени градаций яркости

$$Нулевая: L_0 = L_{\min},$$

$$Первая: L_1 = L_{\min} + \frac{dL_{пор}}{L} L_{\min} =$$

$$= L_{\min}(1 + \frac{dL_{пор}}{L}),$$

$$Вторая: L_2 = L_1 + \frac{dL_{пор}}{L} L_1 =$$

$$= L_1(1 + \frac{dL_{пор}}{L}) = L_{\min}\left(1 + \frac{dL_{пор}}{L}\right)^2,$$

Ступени градаций яркости

$$m-ная: \quad L_m = L_{\max} = L_{\min}\left(1+\frac{dL_{пор}}{L}\right)^{m_L},$$

Логарифмируя, получим:

$$m_L = \frac{\ln \frac{L_{\max}}{L_{\min}}}{\ln\left(1+\frac{dL_{пор}}{L}\right)}, \quad ;$$

Ступени градаций яркости

$$При \quad (\frac{dL_{пор}}{L}) << 1,$$

логарифм в знаменателе

раскладывается в степенной ряд;

ограничиваясь первым членом ряда, получим :

$$m_L \approx \frac{\ln \frac{L_{\max}}{L_{\min}}}{\frac{dL_{пор}}{L}} = \frac{L}{dL_{пор}} \ln K,$$

Величина порогового контраста

$$dC\,св = \ln \frac{dL}{L_{\phi}},$$

$$\frac{(L - L_{\phi})}{L_{\phi}} = \frac{dL}{L_{\phi}} = \left(\frac{dL_{\min}}{L_{\phi}}\right)_{пор},$$

К определению числа градаций яркости

$$L_1 = L_{\min} + \delta L_{\min} = (1+\delta) L_{\min},$$

$$L_2 = L_1 + \delta L_1 = (1+\delta)^2 L_{\min},$$

$$L_{\max} = (1+\delta)^m L_{\min},$$

$$m = \frac{\ln(\frac{L_{\max}}{L_{\min}})}{\ln(1+\delta)},$$

- m – число ступеней или градаций яркости

Число градаций

$$m = \frac{\ln(\frac{L_{\max}}{L_{\min}})}{\delta} \approx \frac{2,3}{\delta} \lg \frac{L_{\max}}{L_{\min}},$$

$$\ln(1+\delta) \to \delta,$$

$$\delta = 0,02...0,05 \approx Const,$$

Число градаций

- При Lmax = 300кд/м^2
- Lmin = 3 кд/м^2
- lg 100 = 2
- При δ = 0,02…0,05
- $m_{L\,(max)}$ = 2,3/0,02 x 2 = 230
- $m_{L\,(min)}$ = 2,3/0,05 x 2 = 92
- m_L = 230…92

«Черное» и «белое»

- Обратим внимание на следующую особенность нашего зрения:
- При наличии яркого «***белого***» - «***чёрное***» в изображении на экране дисплея выглядит гораздо более ***чёрным***, чем тот же участок экрана выключенного дисплея при тех же условиях внешней засветки!

Максимальная и минимальная яркость

- Максимальная яркость белых деталей изображения современных дисплеев может достигать

$$L_{\text{из}\max} = 300...500 \quad (\text{кд/м}^2)$$

- При этом, в каждом изображении в большинстве случаев желательно наличие деталей с яркостями, близкими к значениям $L = L_{\text{из}\,max}$ и $L_{\text{из}\min} \to 0$ ограниченными параметрами монитора и условиями наблюдения изображения

Паразитные засветки Lпар

- Внутренняя и внешняя паразитные засветки ***Lпар*** увеличивают среднюю яркость, но снижают максимальный контраст репродукции $K_{из\ max}$, который и так, из-за малых размеров экрана и малой средней яркости (по сравнению с соответствующими параметрами оригинала) в большинстве случаев меньше максимального контраста оригинала $K_{о\ max}$:

Контраст изображения при наличии паразитной засветки

$$K'_{\text{из}} = \frac{L_{\text{изmax}} + L_{\text{пар}}}{L_{\text{изmin}} + L_{\text{пар}}} < K_{\text{изmax}} < K_{o\,\text{max}} \quad (2.27)$$

Т.о. на экране дисплея уменьшается
Не только диапазон воспроизводимых яркостей но и число воспроизводимых градаций оригинала A_0, т.е. $A_{из} < A_0$.

Примеры:

1. Lmax = 300 кд/м^2

Lmin = 3 кд/м^2

При Lпар=0, К= 100

При Lпар=10, К ≈24

2. Lmax = 100 кд/м^2

Lmin = 1 кд/м^2

При Lпар=0, К= 100

При Lпар=10, К ≈10

Видеосистема

- Телевизионная (компьютерная) видеосистема (ТВС) – комплекс оптических и радиотехнических устройств осуществляющих преобразование оптического информационного сообщения (изображения оригинала) в электрические сигналы, их передачу по каналу связи и обратное преобразование в оптическое информационное сообщение (изображение репродукции)

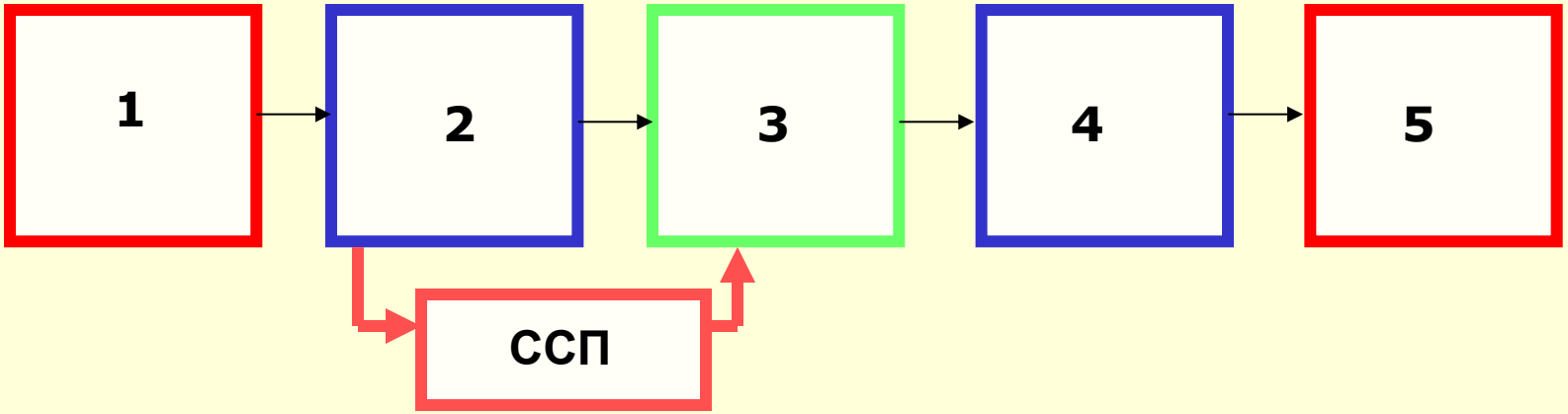
Требования к ТВС

- ТВС должна:
- 1 - Обеспечить максимально возможное соответствие репродукции оригиналу
- 2 - Обеспечить максимально эффективную передачу электрических сигналов сообщения по каналу связи или хранение сообщения на каком-либо носителе
- Эффективность подразумевает экономичность расходования частотного ресурса, (требуемого объема памяти), высокое отношение сигнал/шум, минимальные (незаметные глазом) искажения

Требования к ТВС

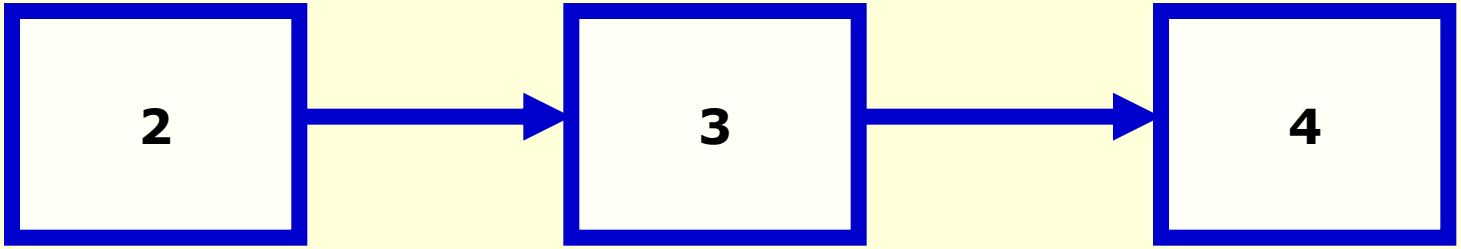
- Требования (1) и (2) противоречивы.
- Задача ТВС – обеспечить оптимальное согласование характеристик и параметров получателя сообщения (например – органов зрения) с характеристиками и параметрами сообщения и канала передачи

Обобщенная структурная схема ТВС, рис. 3.1



- 1 – Источник сообщений ***P(λ)***
- 2 – Датчик изображения ***E {L(x,y);C(x,y)} → u(t)***
- 3 – Канал передачи изображения ***u(t);***
- 4 – Устройство приема и воспроизведения сигнала изображения ***u(t) → {L(x,y);C(x,y)}***
- 5 – Получатель сообщения ***F {L(x,y);C(x,y);t}***
- *ССП – Сигнал синхронизации приемника*

Укрупненная структурная схема ТВ системы, рис.3.2

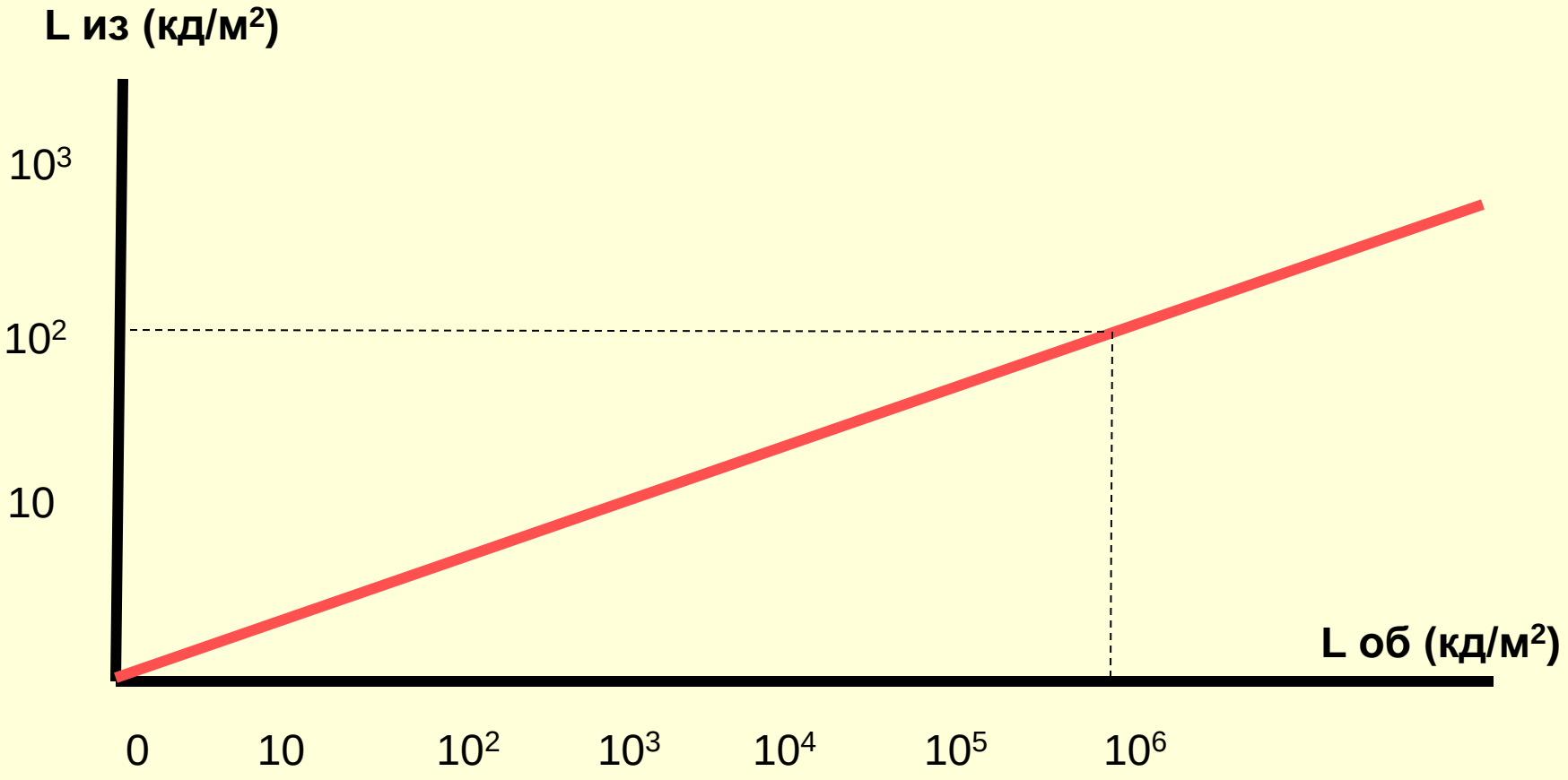


2 – преобразование свет-сигнал

3 – преобразование сигнал-сигнал

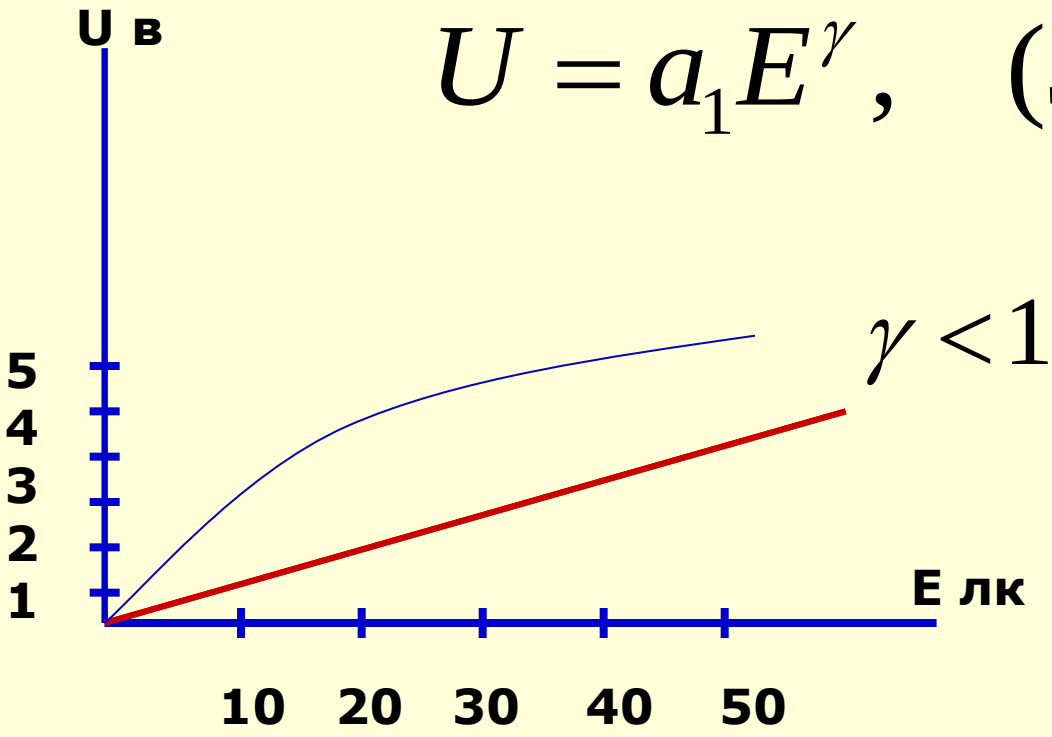
4 – преобразование сигнал-свет

Пропорциональное отображение яркости объекта, рис.3.3



Преобразование свет-сигнал, рис.3.4

$$E(x, y, z, t) \rightarrow U(t), \quad (3.1).$$

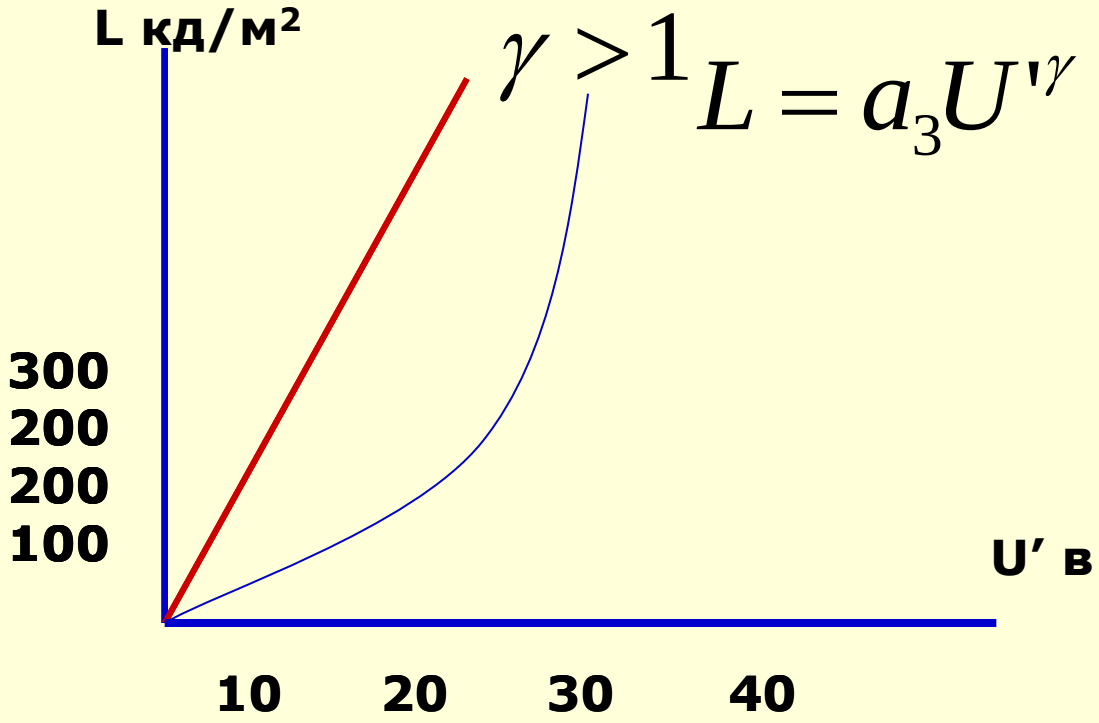


$$U = a_1 E^{\gamma}, \quad (3.2).$$

$$\gamma < 1$$

Преобразование сигнал-свет, рис.3.5

$$U'(t) \rightarrow L(x, y, t), \quad (3.3)$$

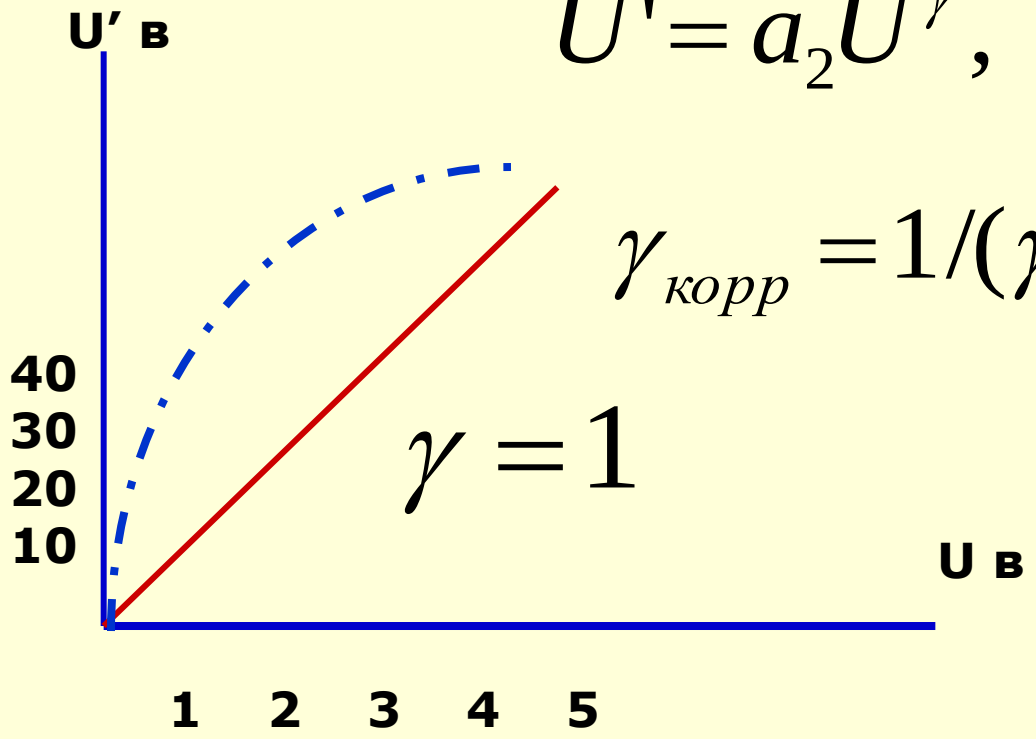


$$\gamma > 1 \quad L = a_3 U'^{\gamma}, \quad (3.4)$$

Преобразование сигнал-сигнал, рис.3.6

$$U(t) \rightarrow U'(t), \quad (3.5)$$

$$U' = a_2 U^{\gamma}, \quad (3.6)$$



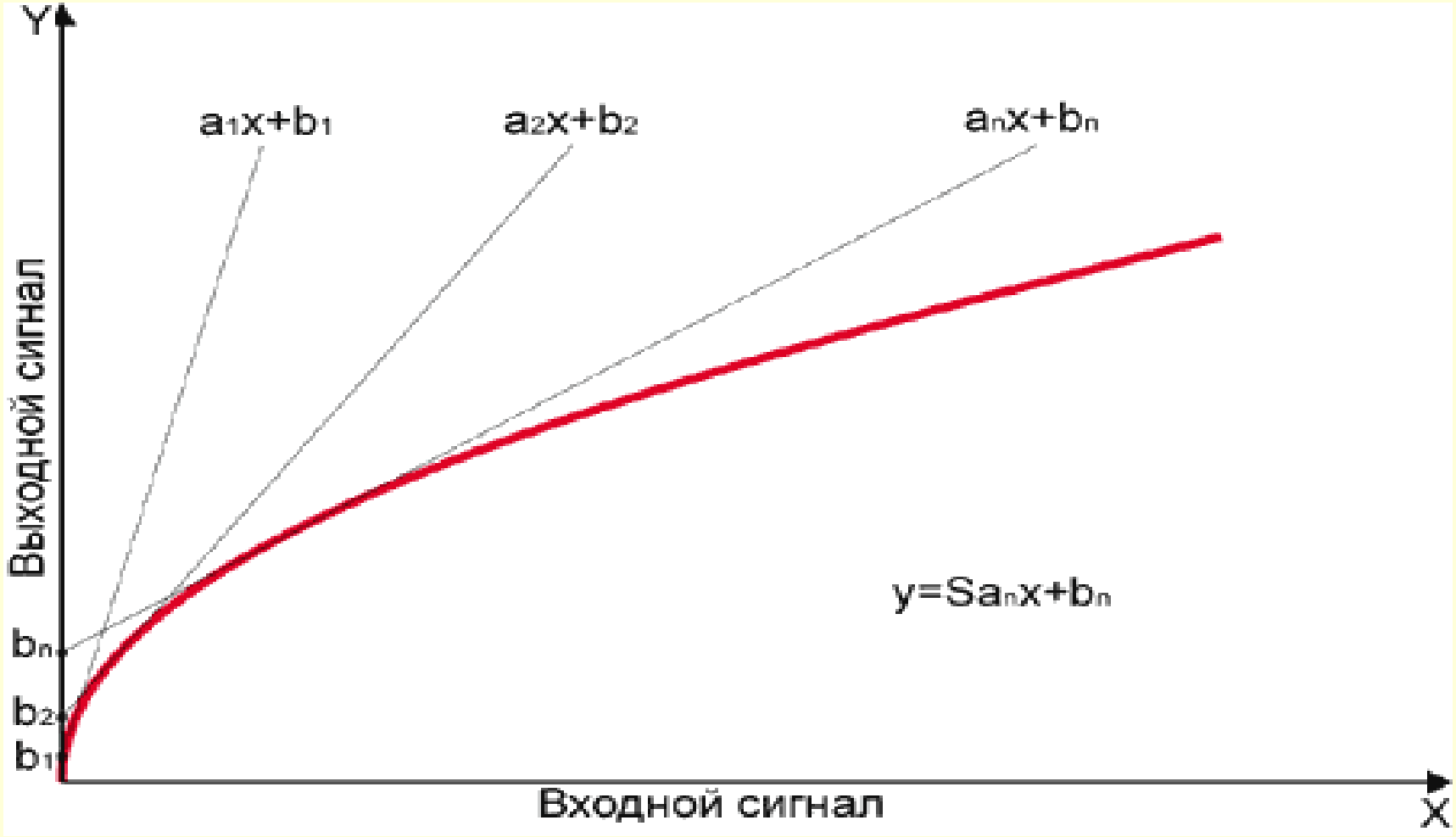
$$\gamma_{корр} = 1/(\gamma_{кам} \bullet \gamma_{д}), (3.7)$$

Гамма-коррекция в видеосистеме

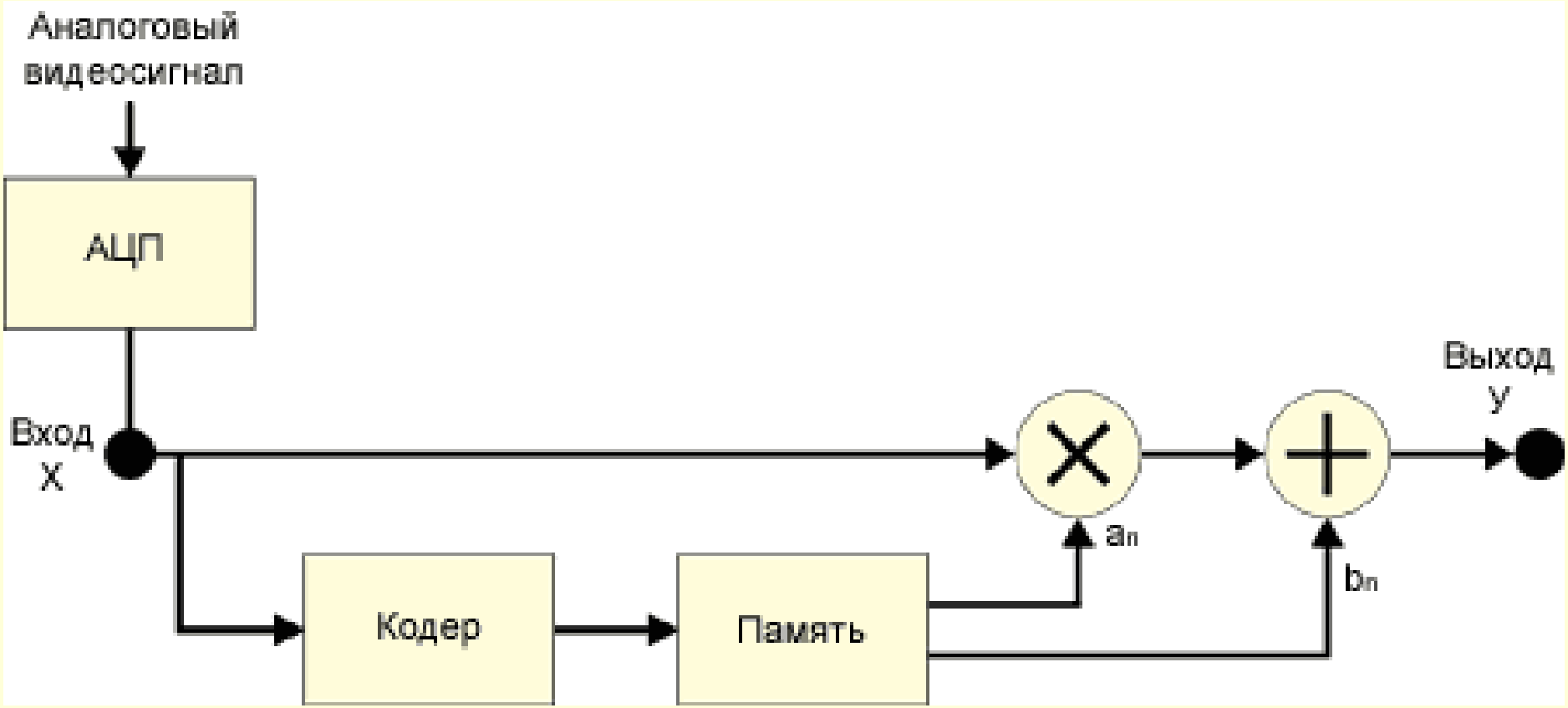
Гамма-коррекция

$$\gamma_{корр} = 1/(\gamma_{кам} \bullet \gamma_{д}), (4.1)$$

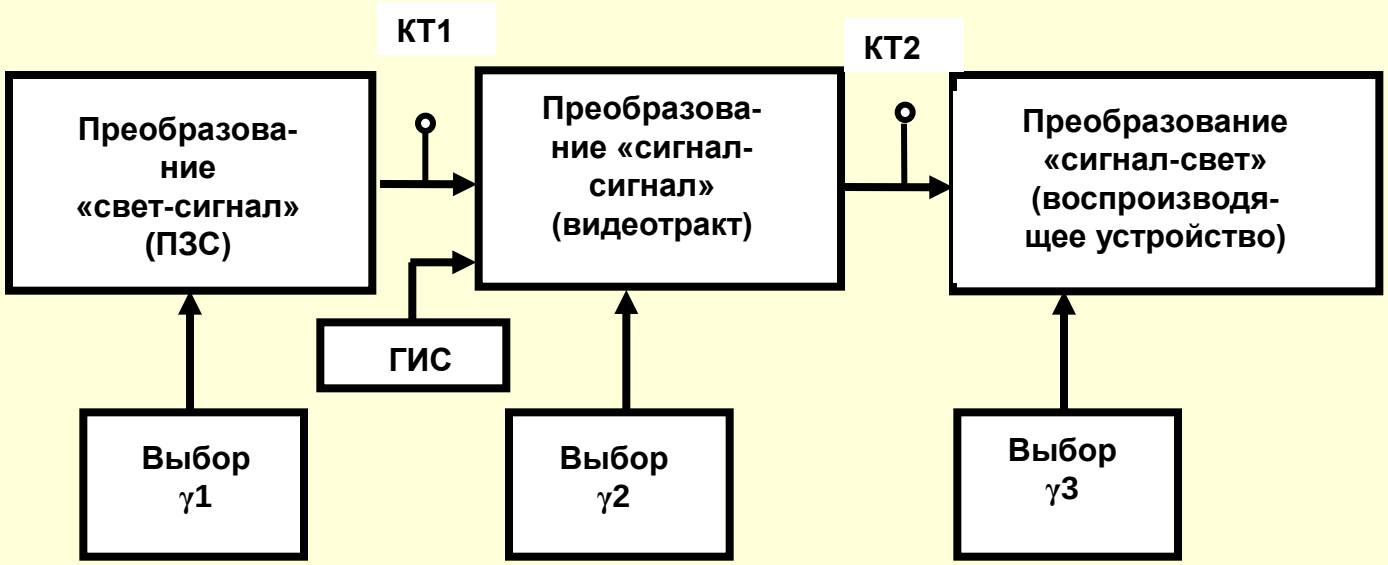
Синтез характеристики гамма-корректора кусочно-линейной аппроксимацией, рис.4.1.



Структурная схема гамма-корректора, рис.4.2.



Структурная схема лабораторной работы «Исследование гамма-корректора», рис.4.3



Преобразование свет-сигнал

- Преобразование свет – сигнал в современных видеокамерах реализуется твердотельными датчиками изображения на приборах с зарядовой связью (ПЗС);

$$U_{ПЗС} = k_1 E_0^{\gamma_{ПЗС}} \qquad (4.2.)$$

где E_0 - освещенность объектов передачи;

$\gamma_1 = \gamma_{ПЗС} \leq 0{,}96 \ldots 0{,}98 \approx 1{,}0$

– показатель степени характеристики преобразования свет-сигнал ПЗС; k_1 – коэффициент пропорциональности.

Преобразование сигнал-свет

$$L_{из} = k_З U_С^{\gamma_{ВУ}} \qquad (4.3)$$

Форма характеристики преобразования сигнал-свет определяется принципом работы и способом управления яркостью изображения $L_{из}$ воспроизводящего устройства (ВУ):

$U_С$ – мгновенное значение сигнала яркости;

$k_З$ – коэффициент пропорциональности;

$\gamma_З = \gamma_{ВУ} \geq 2{,}2\ldots2{,}8$ – показатель степени нелинейности характеристики преобразования сигнал-свет воспроизводящего устройства.

Настройка гамма-коррекции

- Так как характеристика ПЗС близка к линейной, форма характеристики гамма-корректора определяется, в основном, преобразованием сигнал–свет (воспроизводящим устройством – жидкокристаллическим дисплеем, (ЖКД), электронно-лучевой трубкой, (ЭЛТ), плазменной панелью (ПП) и т.п.)

Гамма-корректор

- Гамма-корректор – одно из звеньев преобразования сигнал – сигнал, (комплекс устройств обработки, преобразования и усиления сигналов изображения в видеотракте ТВ системы)
- Как правило, конструктивно гамма-корректор включается в видеотракт видеокамеры и, реже, в видеотракт высококачественных ВУ

Настройка гамма-коррекции

- Исходя из формулы (4.1), с учетом y_{BY}= *2,2…2,8,* требуемое значение $\gamma_2 = \gamma_{cc}$ = 0,45…0,36.
- Однако на практике, с учетом особенностей субъективной оценки качества изображения, ТВ стандарты устанавливают значение γ_{cc} гамма-корректора:
  - $\gamma_{корр} = \gamma_{cc} = 1,26 > 1,0.$

Повышение качества изображения

- Повысить качество изображения в ТВ видеосистеме можно только за счет улучшения параметров дисплея и перераспределения градаций по динамическому диапазону изменения яркости репродукции $L_{из\ min} \ldots L_{из\ max}$,

Гамма-коррекция – как творческий прием

- Перераспределение градаций по динамическому диапазону изменения яркости ТВ изображения осуществляется с помощью изменения формы характеристики передачи уровней яркости системы (от «света до света») в гамма-корректоре.
- Эта характеристика (за исключением небольшого участка вблизи уровня черного) может быть аппроксимирована степенной функцией

Гамма-коррекция

$$\frac{L_0}{L_{o\max}} = \left(\frac{L_{\text{из}}}{L_{\text{из}\max}} \right)^{\gamma\,скв}, (4.4)$$

При $\gamma_{скв}$=1 имеет место линейная зависимость яркости деталей изображения от яркости соответствующих деталей оригинала и пропорциональное воспроизведение полутонов по всему диапазону изменения яркости репродукции.

Однако в этом случае при $A_{из}<A_0$ несколько градаций объекта воспроизводятся лишь как одна градация репродукции. Как следствие, распознаваемость объектов ухудшается.

Гамма-коррекция

- **При $\gamma_{скв}$<1 за счет увеличения крутизны характеристики в области уровня черного улучшается опознавание малоосвещенных деталей, но за счет ухудшения распознаваемости деталей, вблизи уровня белого.**
- **При $\gamma_{скв}$>1 улучшается опознавание "белых" деталей (за счет "черных").**
- **Этот случай наиболее приемлем для цветных ТВ систем, несмотря на некоторые искажения цветности объектов, так как *сюжетно важные детали*, как правило, находятся в области бóльшей освещенности.**
- **В вещательном ТВ наилучшее качество изображения в большинстве случаев наблюдается при $\gamma_{скв}$= 1,2 … 1,3.**

Индивидуальный подход к сюжетам

- Индивидуальный подход к отдельным сюжетам требует для формирования наилучшей сквозной (от света до света) характеристики передачи уровней изменения значения гаммы в гораздо более широких пределах, чем это принято в вещательном ТВ.
- Однако ***увеличение крутизны характеристики гамма корректора в области низких освещенностей ведет к снижению отношения сигнал/шум***.

Монохромный дисплей

- В монохромном дисплее характеристика преобразования сигнал-свет определяется формой модуляционной характеристики воспроизводящего устройства и, как правило, аппроксимируется степенной функцией с показателем степени

$$\gamma_{ВУ} \approx 2{,}2,$$

Паразитные засветки Lпар

- Внутренняя и внешняя паразитные засветки ***Lпар*** увеличивают среднюю яркость, но снижают максимальный контраст репродукции $K_{из\ max}$, который и так, из-за малых размеров экрана и малой средней яркости (по сравнению с соответствующими параметрами оригинала) в большинстве случаев меньше максимального контраста оригинала $K_{о\ max}$:

Аналоговый гамма-корректор

Устройство гамма-корректора

- В гамма-корректорах (ГК) полутоновых искажений могут использовать как аналоговые, так и цифровые методы формирования АХ заданной формы.
- Аналоговые ГК используют схемы с нелинейной нагрузкой в коллекторной (эмиттерной) цепи и с амплитудно-зависимым делителем сигнала
- В цифровых ГК используется табличный способ задания формы АХ, устройства перемножения и сложения отсчетов сигналов изображения с заданными табличными коэффициентами.

ГК с нелинейной нагрузкой в эмиттерной цепи

- Коэффициент передачи меняется при изменении сопротивления нагрузки каскада
- В качестве нелинейной нагрузки используются диоды, отпирающиеся поочередно по мере увеличения входного сигнала ($\gamma_к < 1$).
- ГК с амплитудно-зависимым делителем строятся по такому же принципу, рис.5.1.
- Одно из плеч делителя R20-R22 (например, верхнее - R20) шунтируется поочередно отпирающимися диодами, благодаря чему и реализуется нелинейная форма АХ КГ

Рис.5.1.Схема двухканального аналогового гамма-корректора

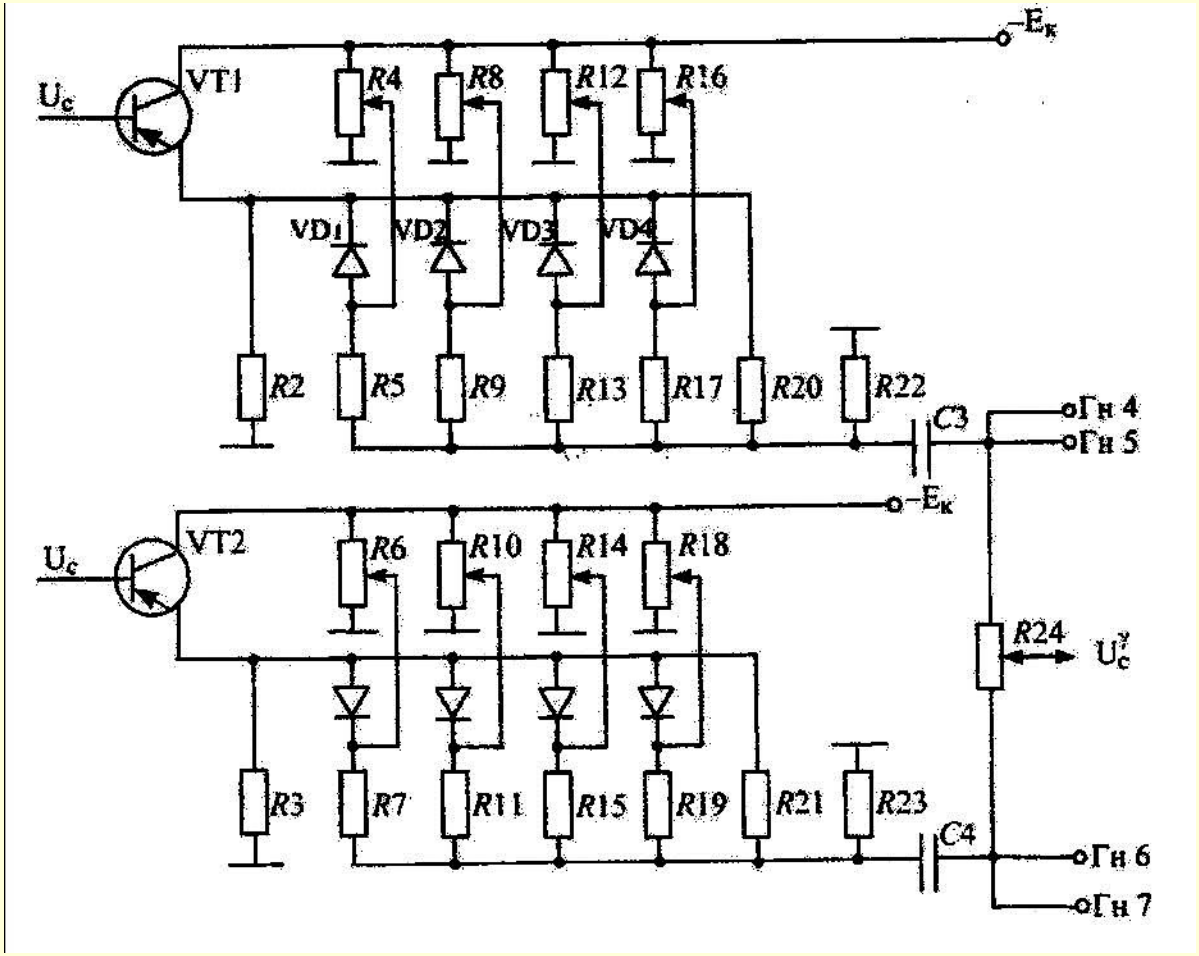
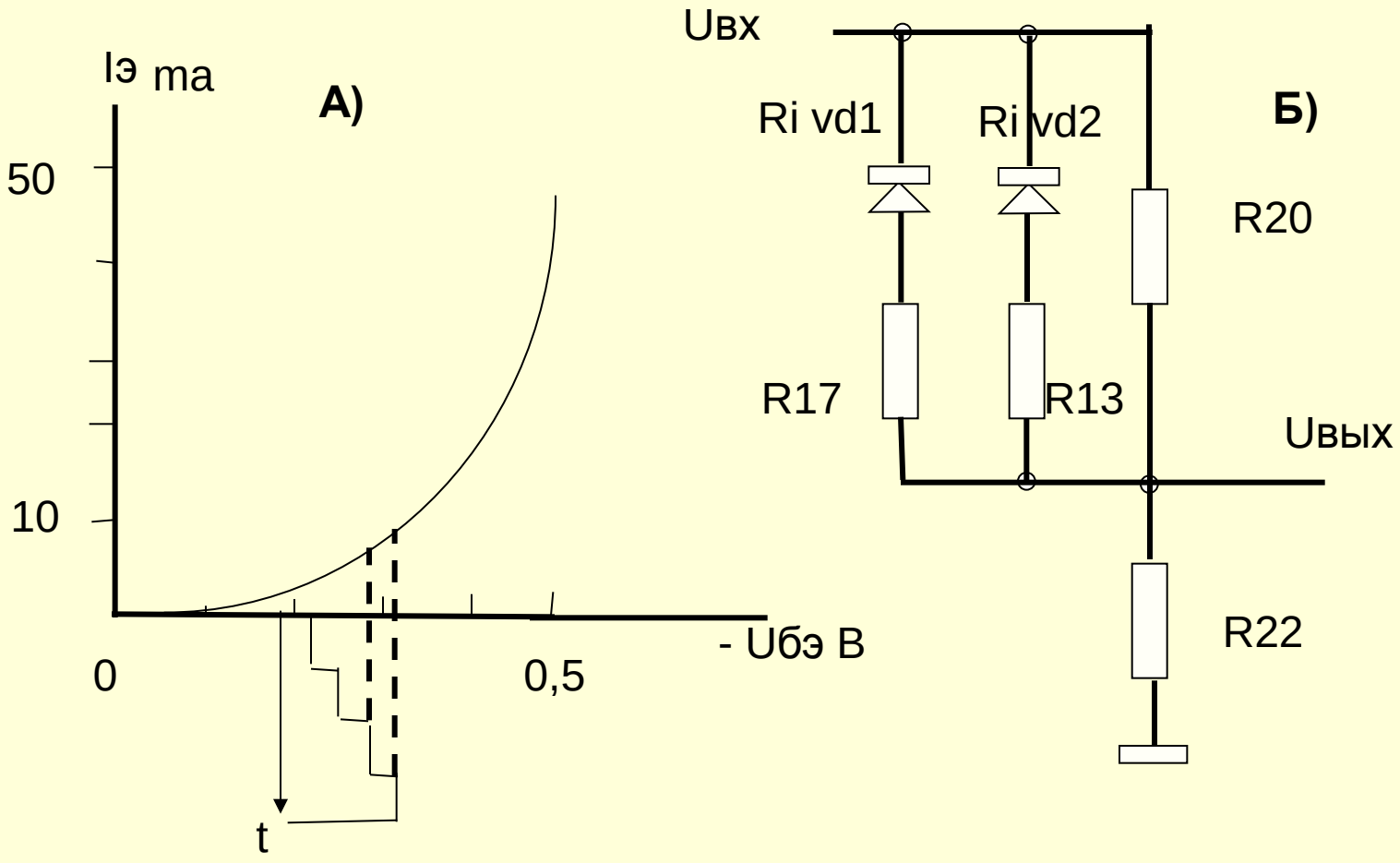


Рис.5.2.Работа схемы



Выходное напряжение

$$Uвых_1 = \frac{U вх}{(R_{20} \parallel R_{17}) + R_{22}} R_{22} \quad (5.1)$$

$$Uвых_2 = \frac{U вх}{(R_{20} \parallel R_{17} \parallel R_{13}) + R_{22}} R_{22} \quad (5.2)$$

$$U\ вых_2 > U\ вых_1$$

Устройство гамма-корректора

- ***Максимальный размах входного сигнала должен быть:***

$$U_{вх\ max} = const, \quad (5.3)$$

- Это необходимо для определенного расположения его относительно рабочей части АХ гамма-корректора
- Коэффициент передачи ГК по амплитуде должен быть равен 1.

Коэффициент передачи ГК

$$K = \frac{U_{вых\,\max}}{U_{вх\,\max}} = 1, \quad (5.4)$$

Нелинейность АХ видеотракта

- Нелинейность АХ видеотракта приводит к нелинейным искажениям ТВ сигнала
- Величину этих искажений можно оценить не только ступенчатым, но и пилообразным сигналом.
- Для удобства измерений иногда в этот сигнал испытательной строки вводятся синусоидальные колебания с частотой 1,2 МГц и размахом порядка 10 % от размаха сигнала яркости, (рис.5.3).
- На выходе контролируемого участка видеотракта синусоидальная насадка выделяется полосовым фильтром и коэффициент нелинейных искажений определяется по формуле:

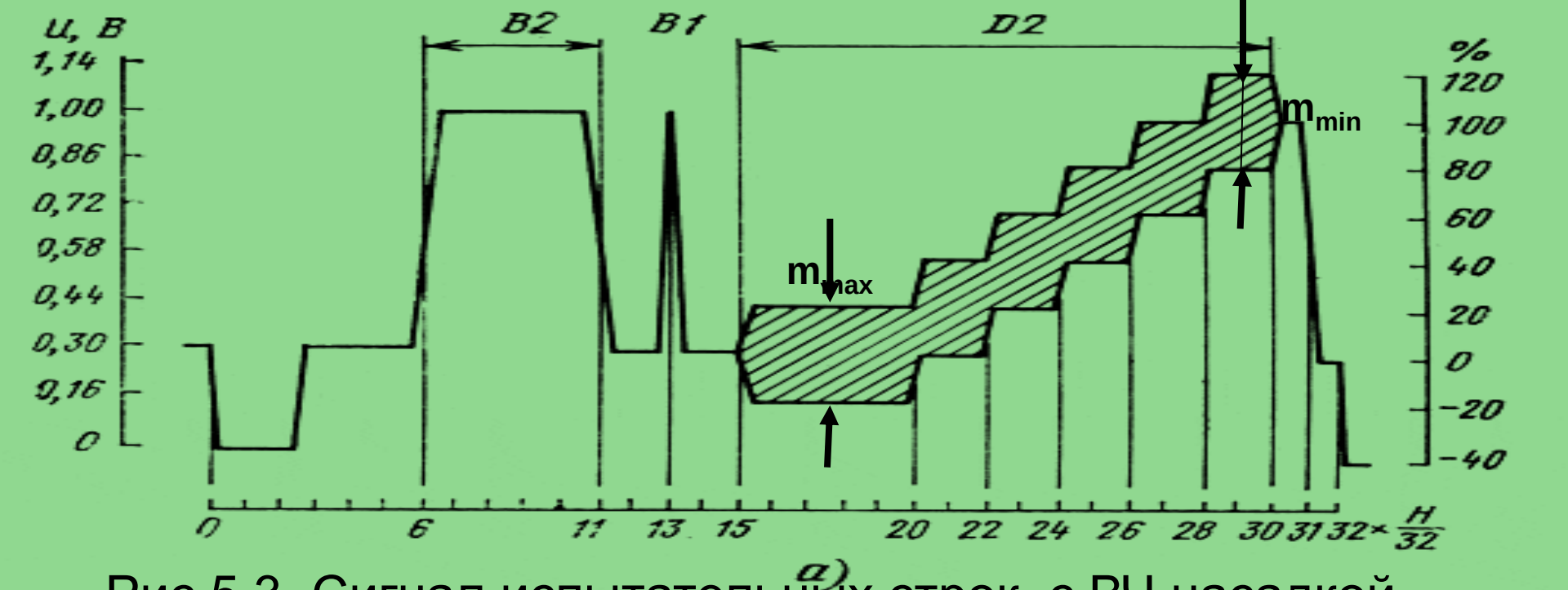
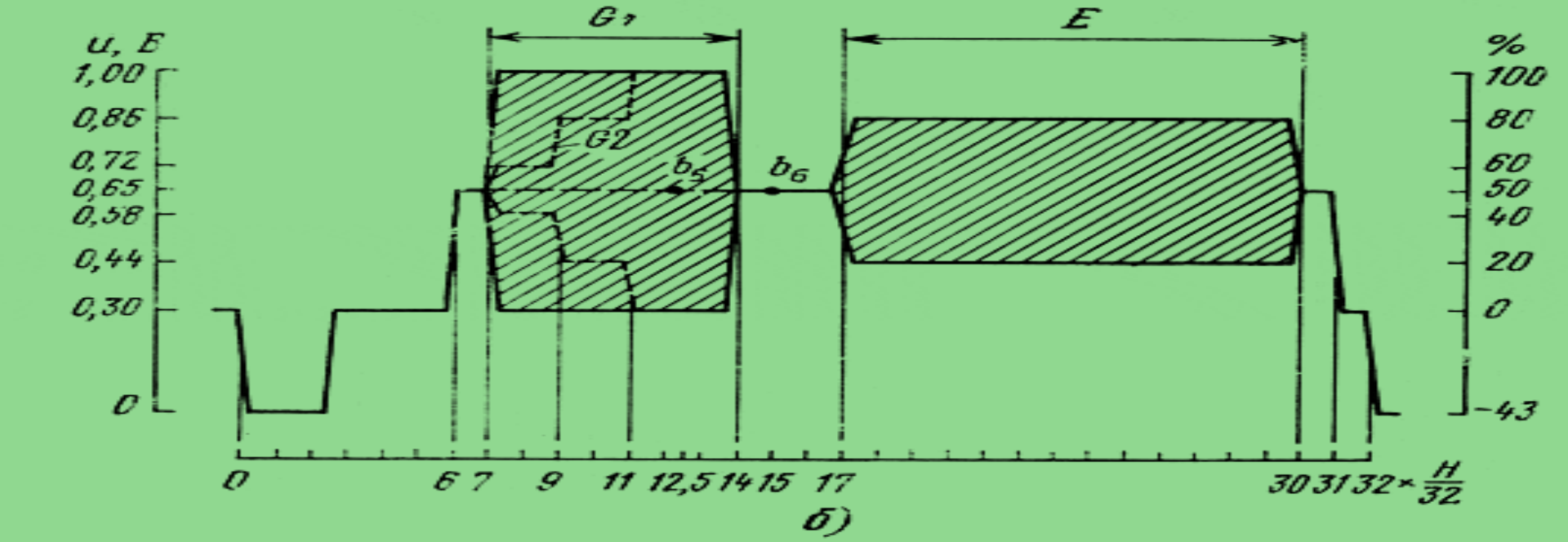


Рис.5.3. Сигнал испытательных строк с ВЧ насадкой



Коэффициент нелинейных искажений

$$k_{н} = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{m_{\max}} \cdot 100\%, \quad (5.5)$$

где m_{max}, m_{min}— экстремальные значения размаха синусоидального сигнала, пропорциональные соответствующим значениям крутизны АХ, или дифференциальному усилению на частоте 1,2 МГц.

Коэффициент нелинейных искажений

- Более точное описание нелинейности АХ дается раздельной оценкой величин коэффициентов нелинейных искажений для областей белого и чёрного:

$$k_{нб} = \frac{m_{ср} - m_{б}}{m_{ср}} \cdot 100\%, (5.6); \quad k_{нч} = \frac{m_{ср} - m_{ч}}{m_{ср}} \cdot 100\%, (5.7)$$

Коэффициент нелинейных искажений

- где $m_б$, $m_ч$ — экстремальные значения размаха синусоидального сигнала в областях белого и черного соответственно;
- $m_{ср}$ — размах сигнала в середине пакета синусоидальных колебаний

Контроль числа воспроизводимых полутонов

- Число воспроизводимых полутонов зависит и от режима работы ВУ, положения органов управления «Яркость» и «Контрастность» ТВ приемника.
- Номинальное число градаций яркости ТВ изображения (особенно, на крупных деталях) может составлять (в современных ВУ с повышенной яркостью) величину, порядка 100…200.

УЭИТ

- Для оценки качества воспроизведения полутонов используется ТВ изображение 10-градационного клина — горизонтальная шкала уровней (перепадов) яркости от *Lmin* до *Lmax*, каждый элемент которой отличается по яркости от соседнего на несколько пороговых градаций (восьмая горизонталь УЭИТ).
- В УЭИТ эта шкала создается с помощью десятиступенчатого сигнала с равноамплитудными перепадами напряжения - «ступеньками».

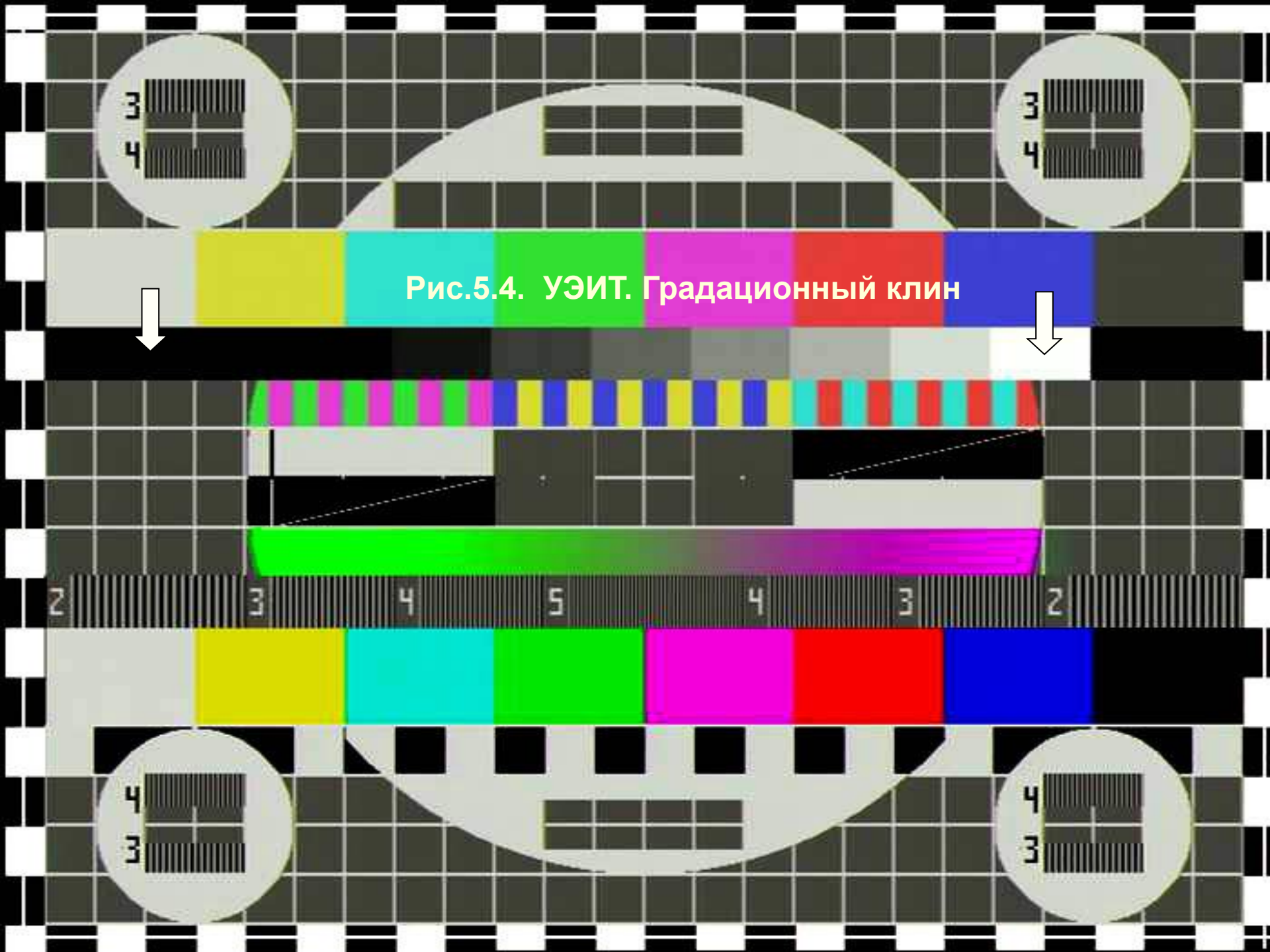


Рис.5.4. УЭИТ. Градационный клин

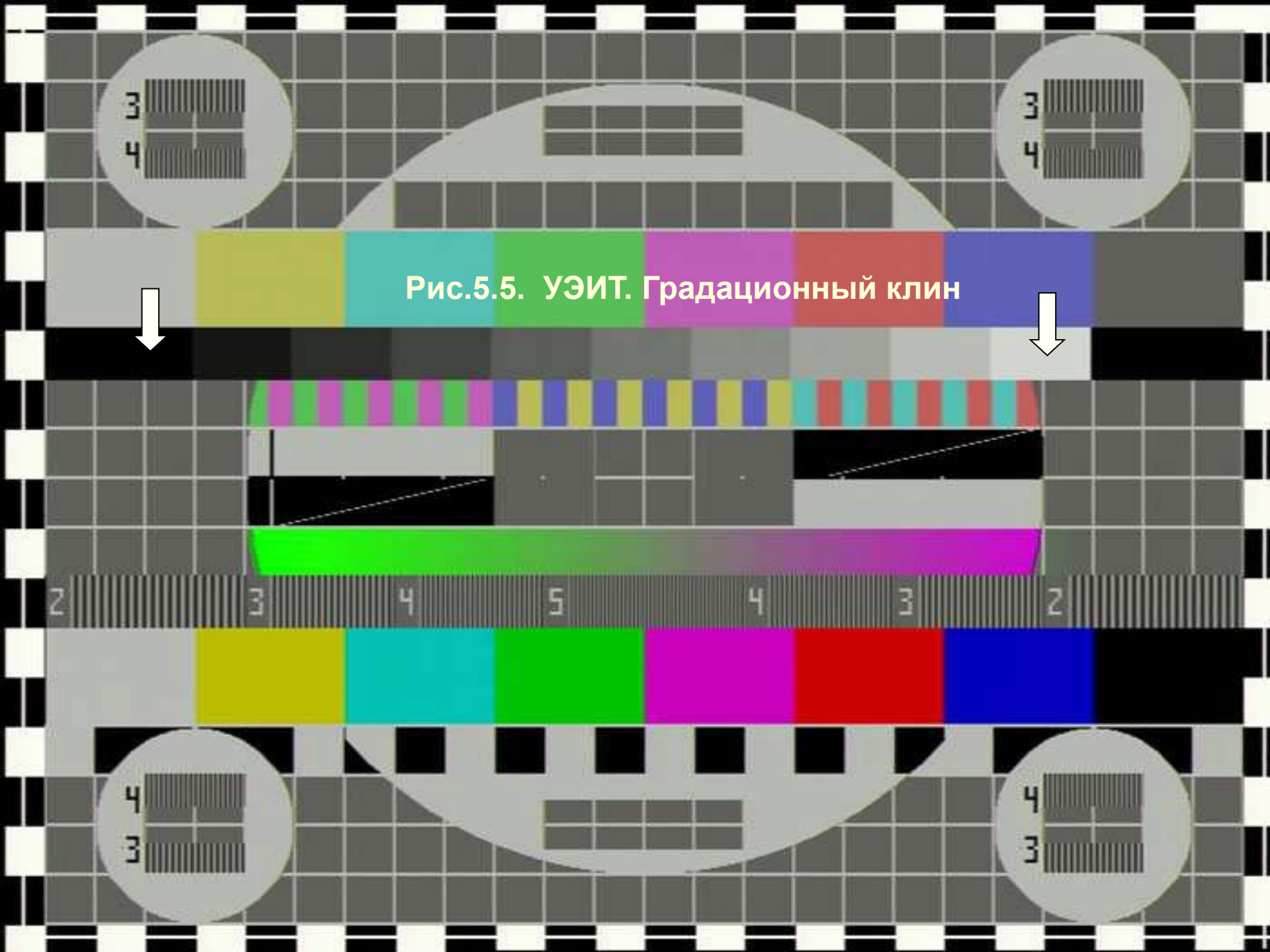


Рис.5.5. УЭИТ. Градационный клин

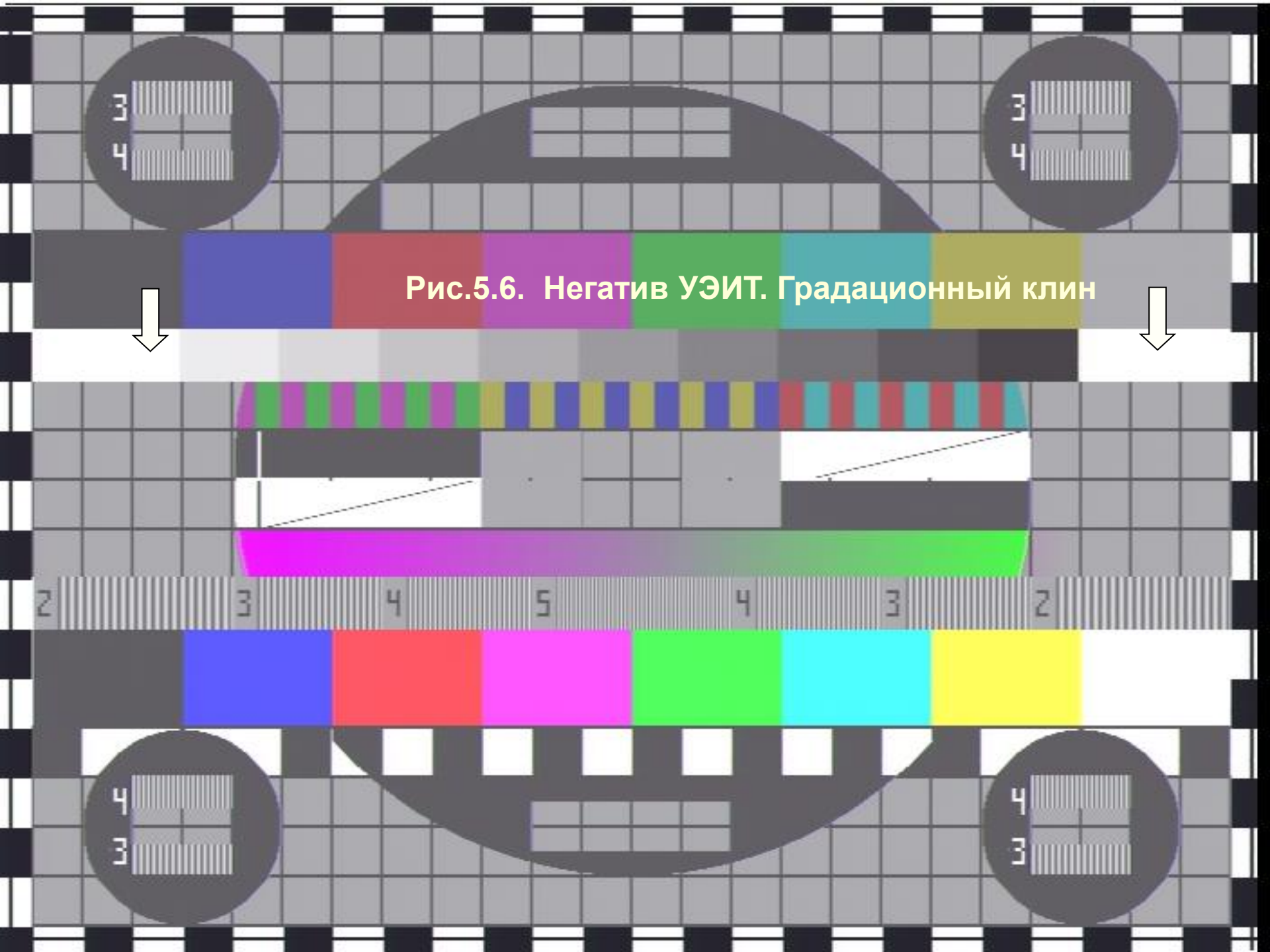


Рис.5.6. Негатив УЭИТ. Градационный клин

Число воспроизводимых градаций

- При отсутствии фиксации уровня черного ТВ сигнала число воспроизводимых градаций ТВ изображения может уменьшиться
- Максимальное количество полутонов получают путем установки (методом последовательных приближений) оптимальных значений яркости, контрастности и гаммы.
- На УЭИТ должны различаться все 10 градаций яркости шкалы градационного клина.
- Гамма-коррекция требует обязательной фиксации уровня черного.

Оптические ТИТ

- В оптических ТВ испытательных таблицах (ТИТ), используемых для тестирования и настройки профессиональной ТВ аппаратуры может быть использована шкала с логарифмическим, квадратичным или линейным распределением яркости вдоль шкалы

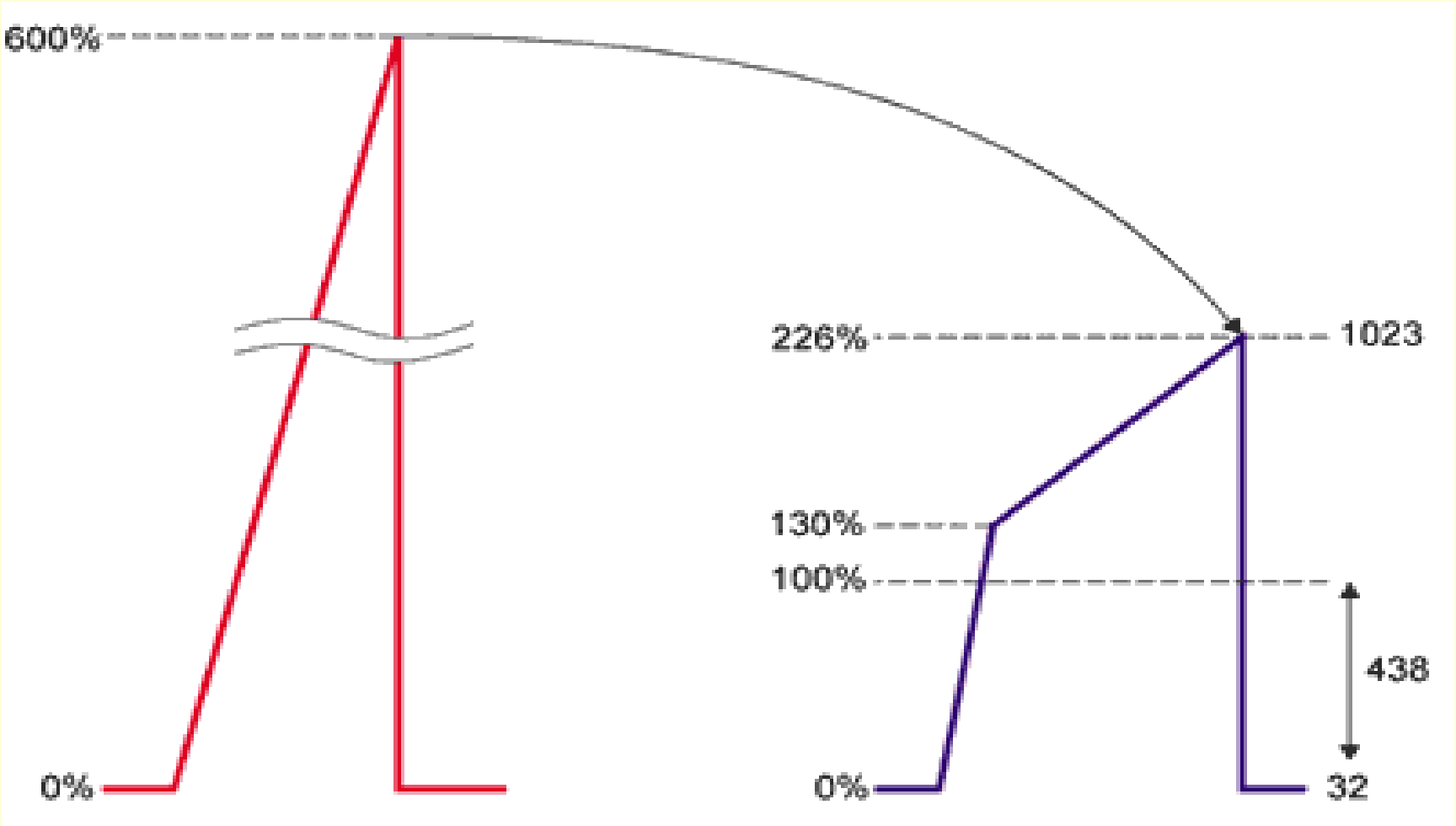
ГК повышает качество изображения

- Выходное напряжение формируется в сумматоре **Σ.**
- Таким образом, с помощью корректора полутоновых искажений можно существенно улучшить воспроизведение полутонов (главным образом) крупных деталей, диапазон изменения яркости которых заключен в сюжетно важном участке динамического диапазона сигнала и, тем самым, повысить качество ТВ изображения.

ГК и компрессия сигнала в области белого (функция knee)

- Для улучшения качества воспроизведения малоконтрастных деталей в области черного или объектов с повышенным контрастом с помощью ГК изменяют номинальную форму АХ видеотракта.
- Используется два основных приема: увеличение крутизны АХ в области черного (растяжка черного) или уменьшение крутизны АХ в области белого (компрессия белого).
- Компрессия белого используется в некоторых типах ТВ камер для сокращения динамического диапазона сигнала и упрощения АЦП, (функция knee).

Сжатие световой характеристики (функция Knee), рис. 5.7,5.8

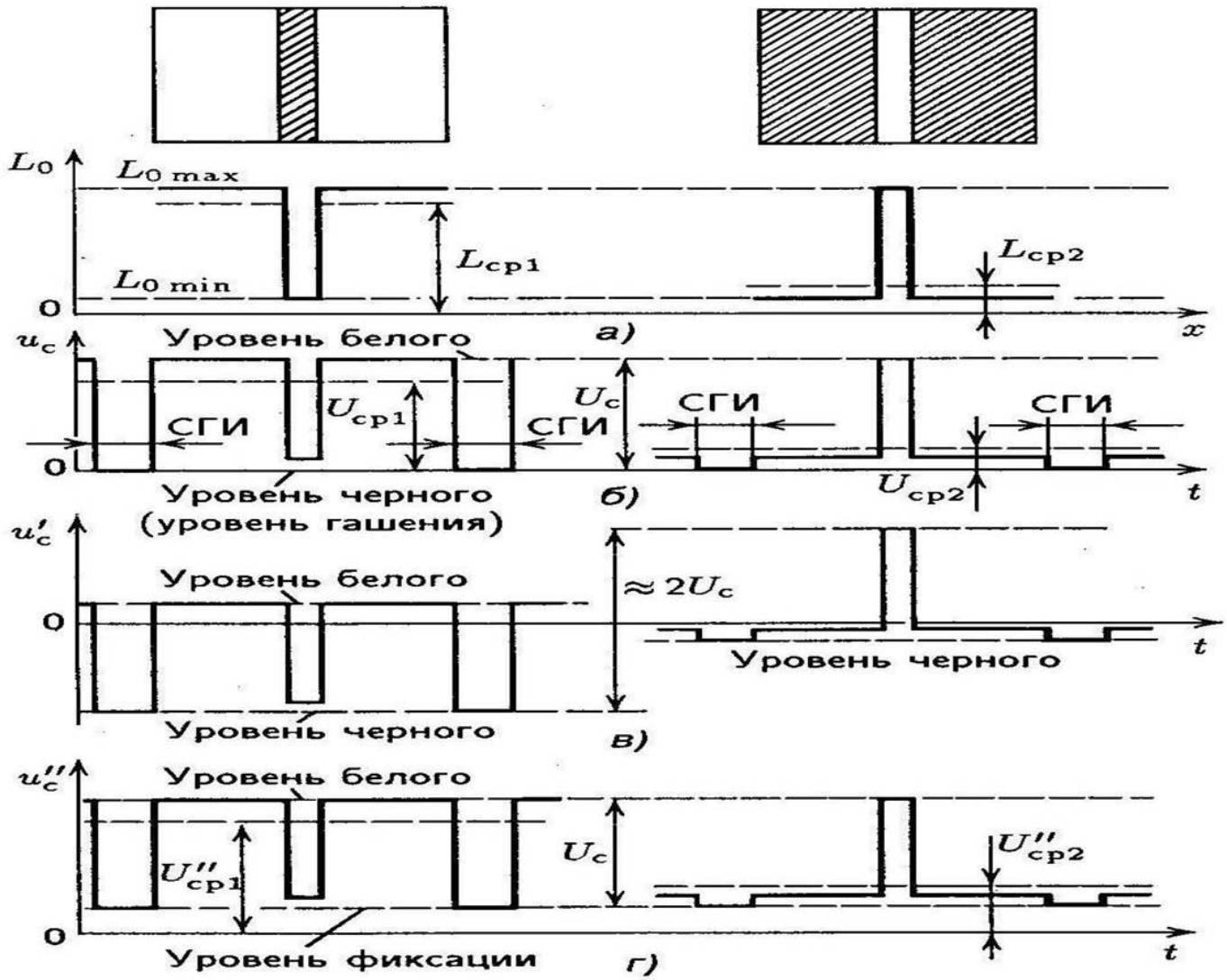


Восстановление постоянной составляющей путем фиксации уровня черного

ВПС в видеотракте

- В видеотракте видеотехнических и ТВ систем операции гамма-коррекции (как и ряду других операций) должна обязательно предшествовать операция восстановления постоянной составляющей.
- Постоянная составляющая восстанавливается путем привязки вершин гасящих импульсов к некоторому постоянному потенциалу (уровню фиксации)

Рис.5.9.Средняя яркость сюжета



Особенности передачи сигнала «постоянной» составляющей, про
порционального средней яркости изображения (СГИ — строчные гасящие
импульсы)

Рис.5.10.Структурная схема ВПС

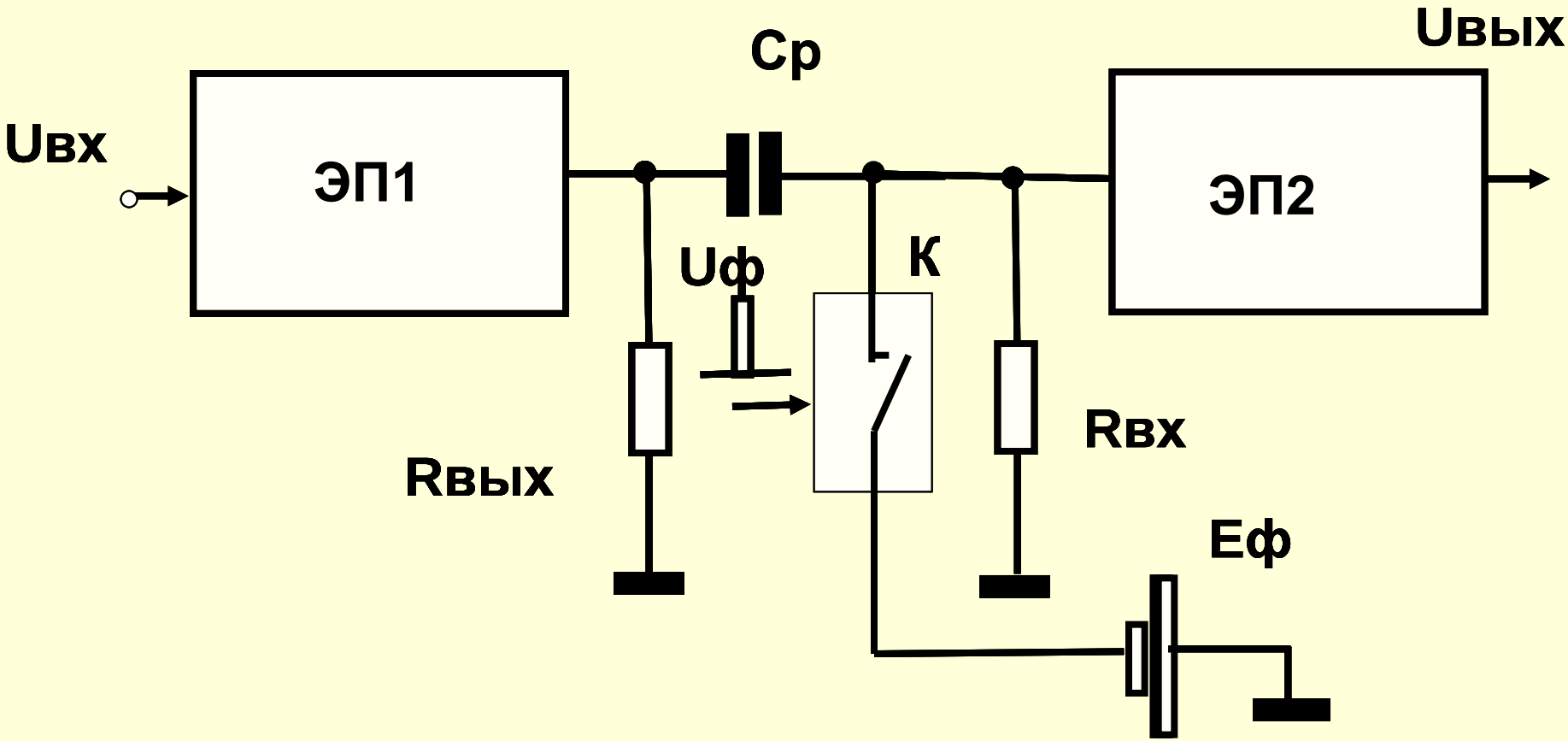


Рис.5.11.Варианты исполнения схем фиксации уровня черного

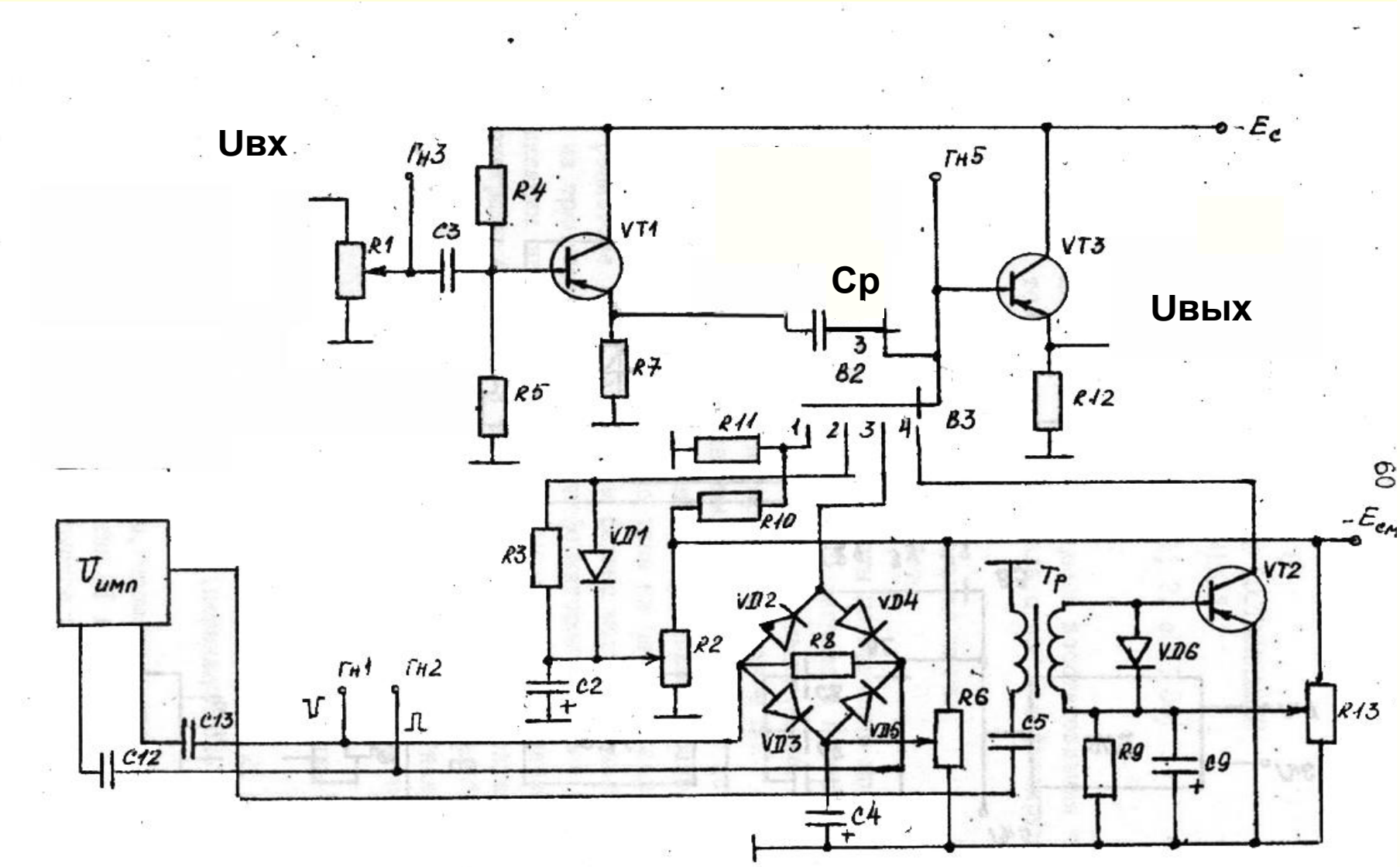
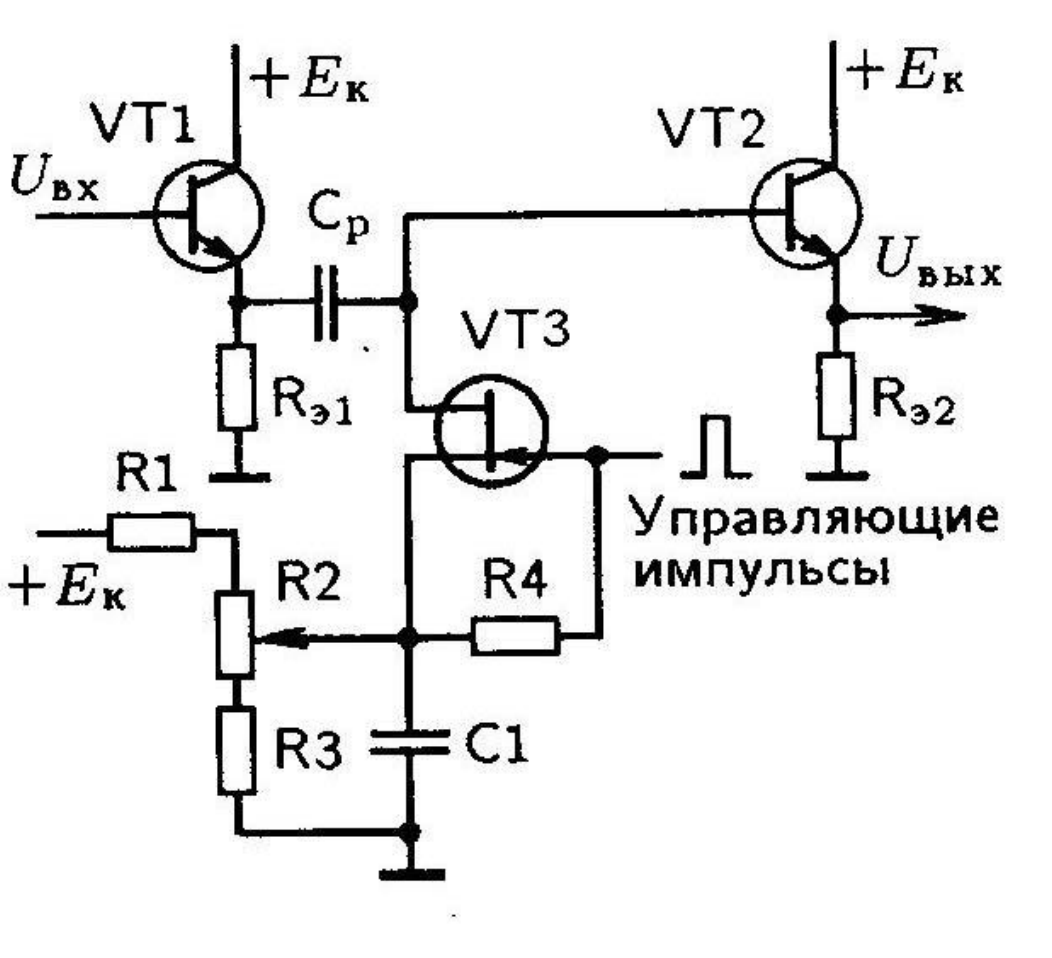


Рис.5.12. Схема фиксации уровня черного



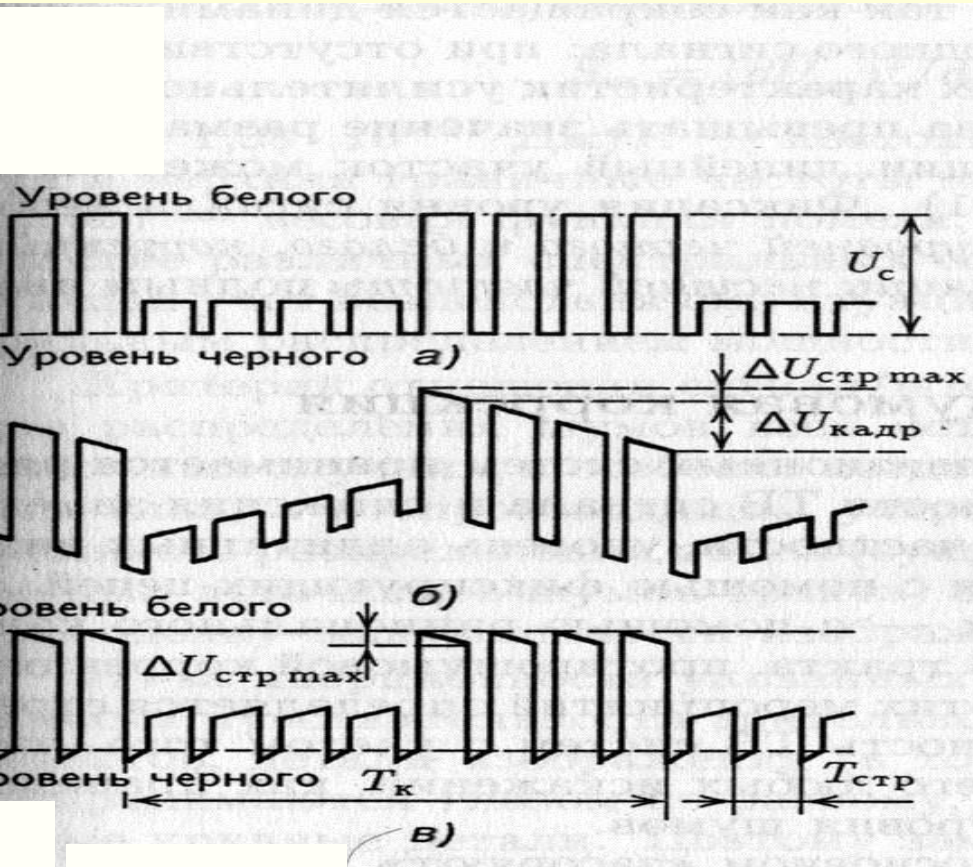
Постоянные времени заряда-разряда:

$$\tau_{зар} = Cp\,(R_{iк} + R_{вых\ ЭП1}), \quad (5.10)$$

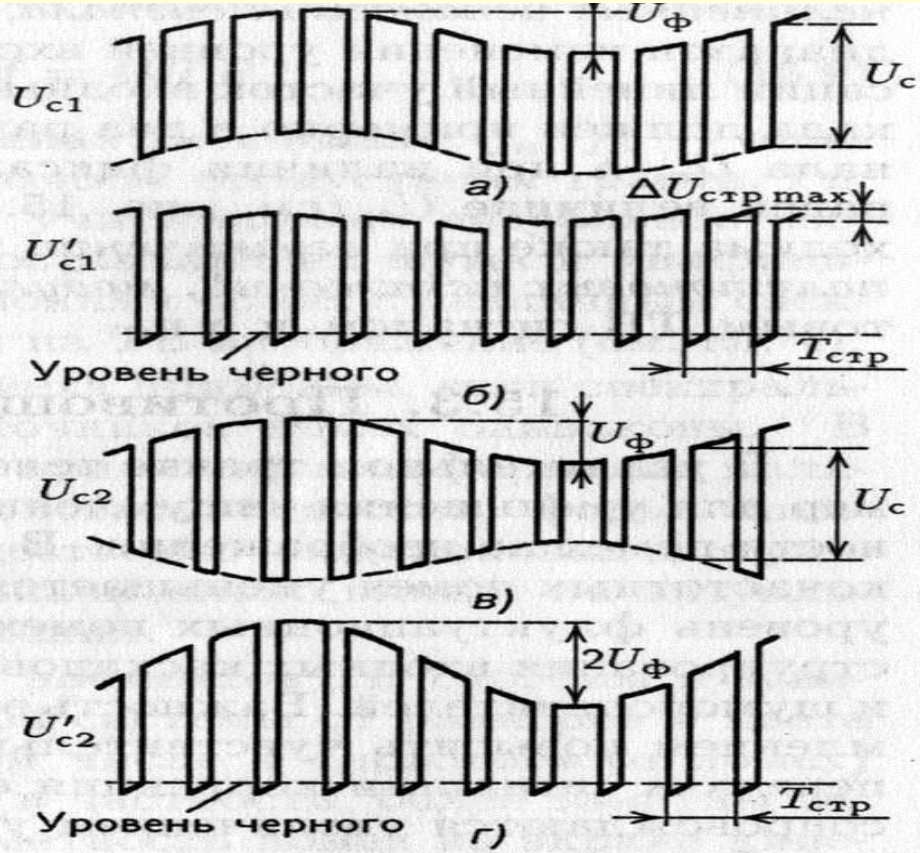
$$\tau_{разр} = Cp\,(R_{вх\ ЭП2}), \quad (5.11)$$

$$\tau_{зар} << \tau_{разр}, \quad (5.12)$$

Рис.5.13. Влияние аддитивной и мультипликативной фоновой помехи на работу схемы ВПС



Коррекция низкочастотных искажений ТВ сигнала с помощью фиксирующих схем: *а* — неискаженный сигнал; *б* — сигнал с утраченными низкочастотными составляющими; *в* — сигнал после фиксации уровня черного



Изменение отношения сигнал/фоновая помеха после фиксации уровня черного: *а* — сигнал $U_{с1}$, линейно сложенный с помехой $U_ф$; *б* — сигнал $U'_{с1}$ после фиксации уровня черного; *в* — сигнал $U_{с2}$, промодулированный помехой $U_ф$; *г* — сигнал $U'_{с2}$ после фиксации уровня черного

Выводы:

- Схема ВПС полностью устраняет влияние аддитивной низкочастотной фоновой помехи на сигналы изображения
- Схема ВПС усугубляет заметность синхронных и несинхронных низкочастотных мультипликативных фоновых помех на экране дисплея

Параметры стандартных систем аналогового ТВ

Исходная предпосылка – требования совместимости

- При разработке стандартов аналогового цветного ТВ вещания выполнялись требования совместимости систем цветного и черно-белого ТВ: прямой, обратной, профессиональной.
- Полный цветовой ТВ сигнал (ПЦТВС) содержит сигнал яркости уплотненный компонентами сигнала цветности

NTSC, PAL, SECAM

- В 60-х гг. XX века приняты к вещанию три несовместимых друг с другом и конкурирующих между стандарта цветного ТВ: NTSC, PAL, SECAM.
- NTSC и PAL передают информацию о цветности путем КБМ (квадратурной балансной модуляции) цветовой поднесущей цветоразностными сигналами. В SECAM используется ЧМ.

Параметры стандартов аналогового ТВ (таб.6.1)

Параметр	Значения в стандартах
Число строк	405, 525, 625, 819
Число кадров (полей)	25, 30 (50, 60)
Ширина радиоканала, МГц	5, 6, 7, 8, 14
Полоса сигнала яркости, МГц	3.0; 4.18; 5.0; 5.5; 6.0; 10.0.
Разнос несущих видео и звука, МГц	3.5; 4.5; 5.5; 6.0; 6.5; 11.15;
Полярность модуляции	Отрицательная (-) Положительная (+)
Тип модуляции несущей звука	АМ, ЧМ

Частотные диапазоны эфирного ТВ вещания (таб.6.2)

Полоса	Диапазон	Частота, МГц	Длина волны, м
I	МВ	48...68	$\lambda = C / f$
II	МВ	87...100	Где:
III	МВ	162...230	$C = 3*10^8$ м/с
IV	ДМВ	470...582	
V	ДМВ	582...862	

Сравнение параметров стандартов, (таб.6.3)

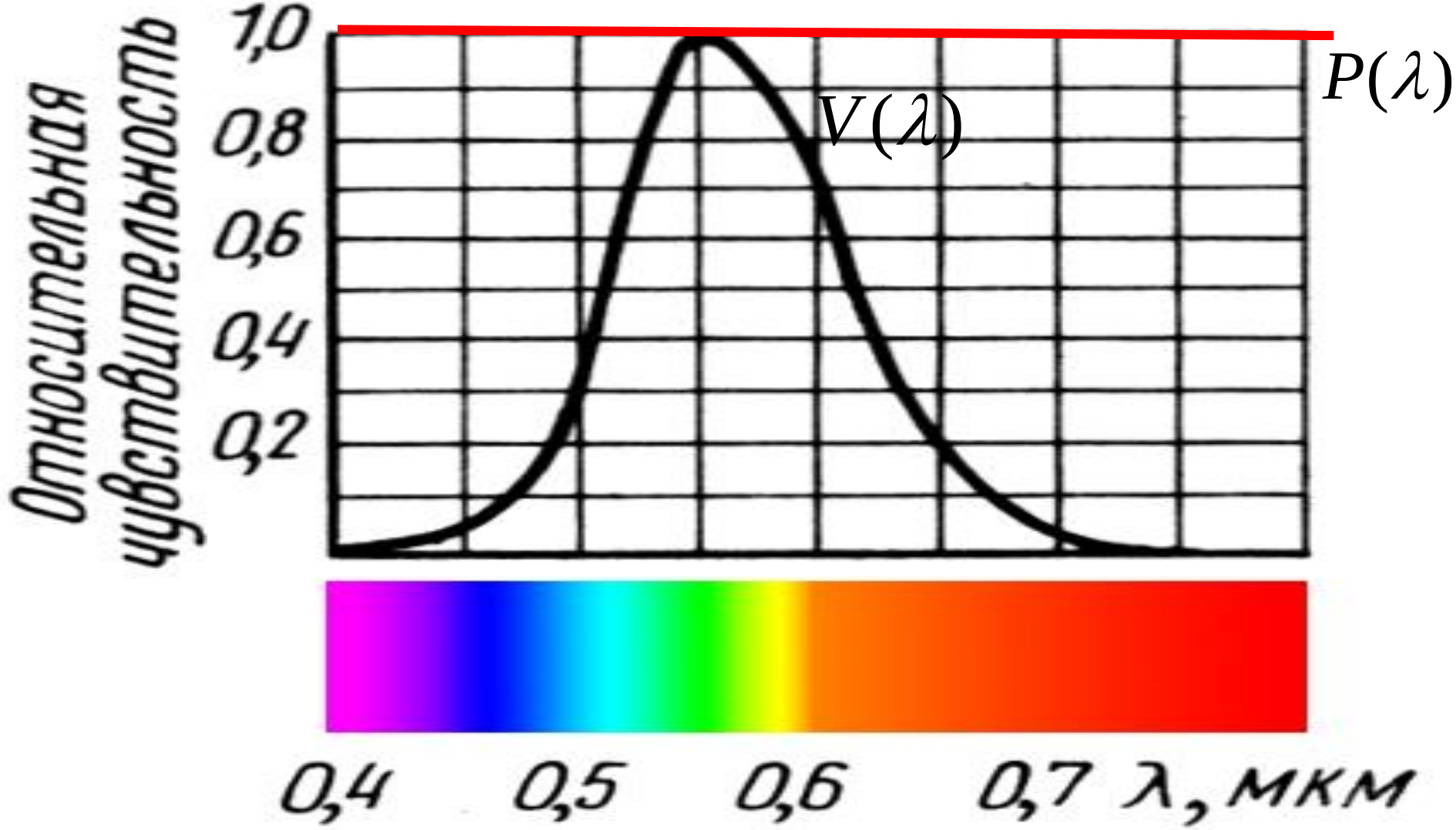
	Число строк	Ширина канала, МГц	Полоса видеосигнала, МГц	Разнос несущих видео/звук, МГц	Полярность модуляции видео	Модуляция несущей звука
B	625	7	5	5.5	-	ЧМ
C	625	7	5	5.5	-	АМ
D	625	8	6	6.5	-	ЧМ
G	625	8	5	5.5	-	ЧМ
H	625	8	5	5.5	-	ЧМ
I	625	8	5.5	6,0	-	ЧМ
K	625	8	6	6.5	-	ЧМ
L	625	8	6	6.5	+	АМ
M	525	6	4.2	4.5	-	ЧМ
N	525	6	4.2	4.5	-	ЧМ

Свойства зрения, влияющие на выбор параметров ТВ стандарта

Цветовое и пространственное зрение

- Параметры цветового и пространственного восприятия определяют выбор тех или иных технических параметров видеосистем
- Идеальная видеосистема должна воспроизводить цветное объемное видеоизображение
- Такая видеосистема должна стоится с учетом фундаментальных свойств зрения

Кривая видности и монохроматические цвета, рис.7.1



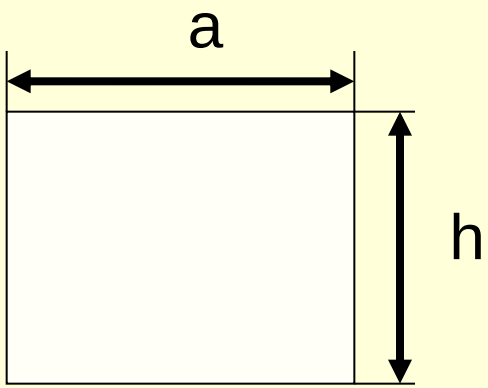
Пространственное видение

- Обусловлено:
- бинокулярностью зрения;
- конвергенцией зрительных осей;
- углом конвергенции (сведения).
- Параллактические углы определяют угловое смещение одноименных точек изображения на сетчатке и величину горизонтального линейного параллакса

Минимальный угол разрешения

- Минимальный угол α, в пределах которого две рядом расположенные точки еще не сливаются в одну
- Величина, обратная минимальному углу разрешения называется остротой зрения w (разрешающей силой зрения)
  - $w = 1/\alpha$, (7.1)
- Во фронтальной плоскости $1' < \alpha < 1{,}5'$ в области поля ясного зрения

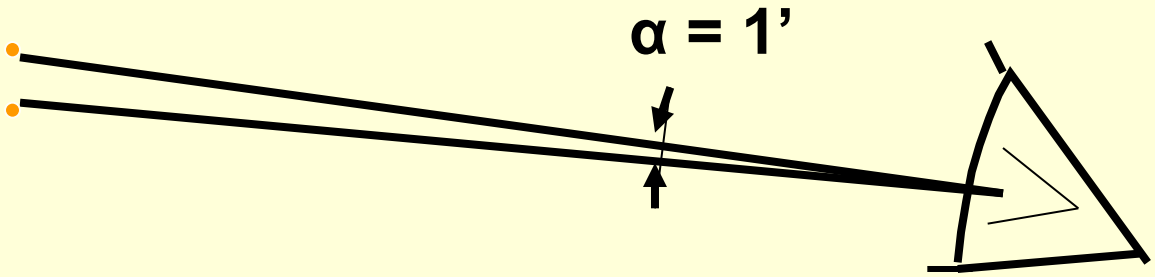
Поле ясного зрения и формат кадра



$$k1 = a/h = 4/3, (7.2)$$

$$k2 = a/h = 16/9, (7.3)$$

Разрешающая способность и число строк разложения



w = 1/ α

В ТВ z=625 , k1= 4/3

768x575 или 720x576

В ТВЧ z=1125, k2=16/9

или 1920x1080

Острота зрения, (таб.7.4)

Сочетание фон – изображение	Острота зрения
Черно-белое	100%
Черно-зеленое	94%
Черно-красное	90%
Черно-синее	26%
Зелено-красное	40%
Красно-синее	23%
Зелено-синее	19%

Острота зрения

- Существенно зависит от контраста изображение/фон, яркости фона, сочетания цветов
- Во фронтальной плоскости $\alpha_{ф} = 1'$
- Глубинная острота зрения $\alpha_{г} = 10''$

Инерционность зрения

- Критическая частота, при которой мерцания становятся незаметными, зависит от скважности импульсов и яркости изображения. При скважности =0,5:

$$f\ кр = a_o \lg L\, ср + b_o, (7.4);$$

$$где: a_o = 9{,}6; \quad b_o = 26{,}8;$$

Закон Тальбота

$$L\,ср = \frac{1}{T}\int_0^T Lo(t)dt, (7.5)$$

$$при \quad t \le t\,кр; \quad f\,мельк \ge f\,кр$$

$$\frac{L\,виз(t)}{L\,виз_{\max}} = \frac{Lo}{Lo_{\max}} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right), (7.6)$$

Воспроизводящие устройства

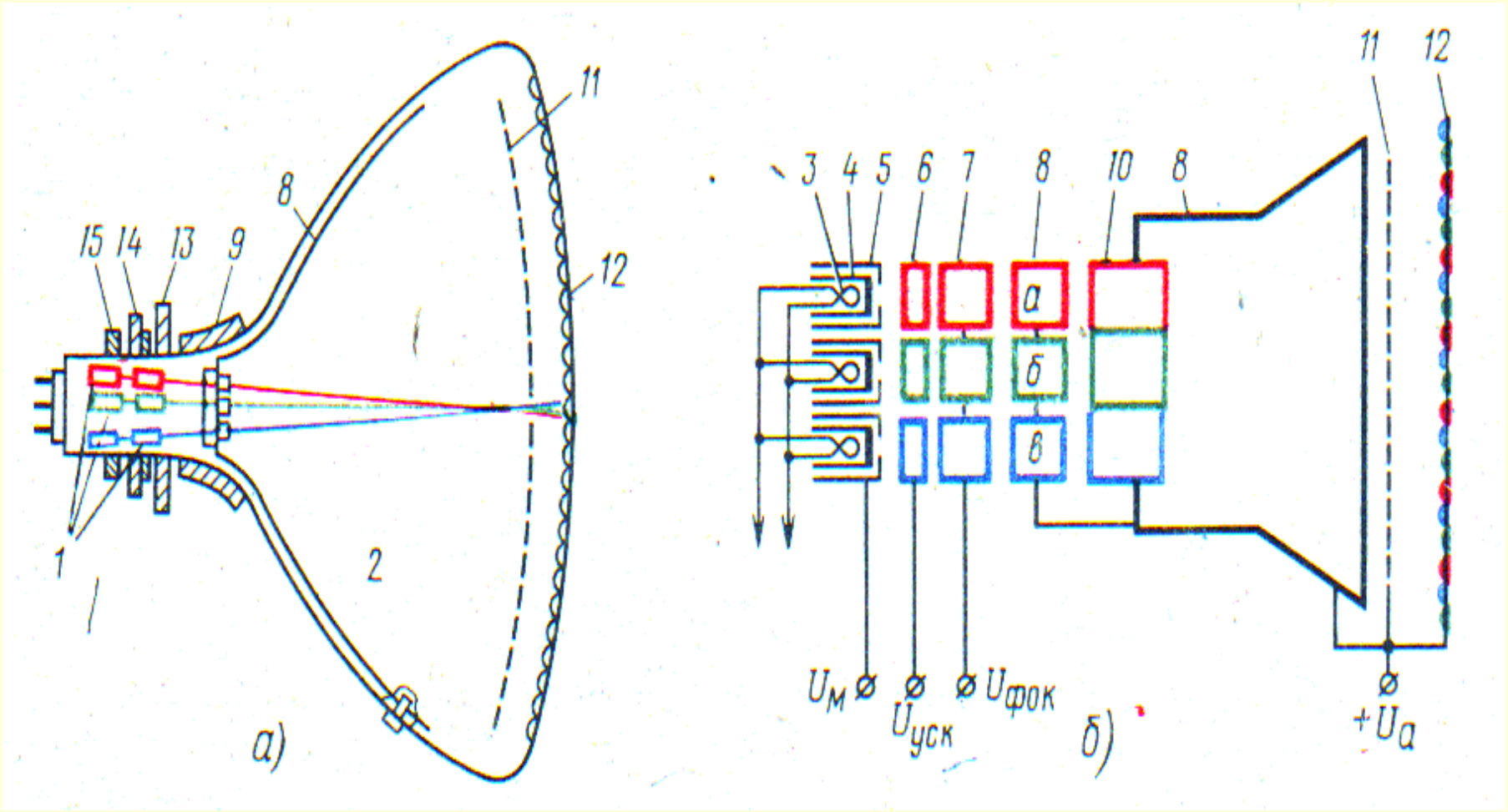
Типы ВУ

- ***Светоизлучающие***: кинескоп, плазменная панель, OLED – панель
- ***Светомодулирующие:*** LCD (ЖК) – панель, проекционные системы.
- ***Важнейшие характеристики ВУ:***
- Колориметрические (цветовой охват, точность цветовоспроизведения и т.п.)
- Светотехнические (яркость, контрастность и т.п.)
- Технологические (разрешающая способность, инерционность, быстродействие, потребляемая мощность и т.п.)

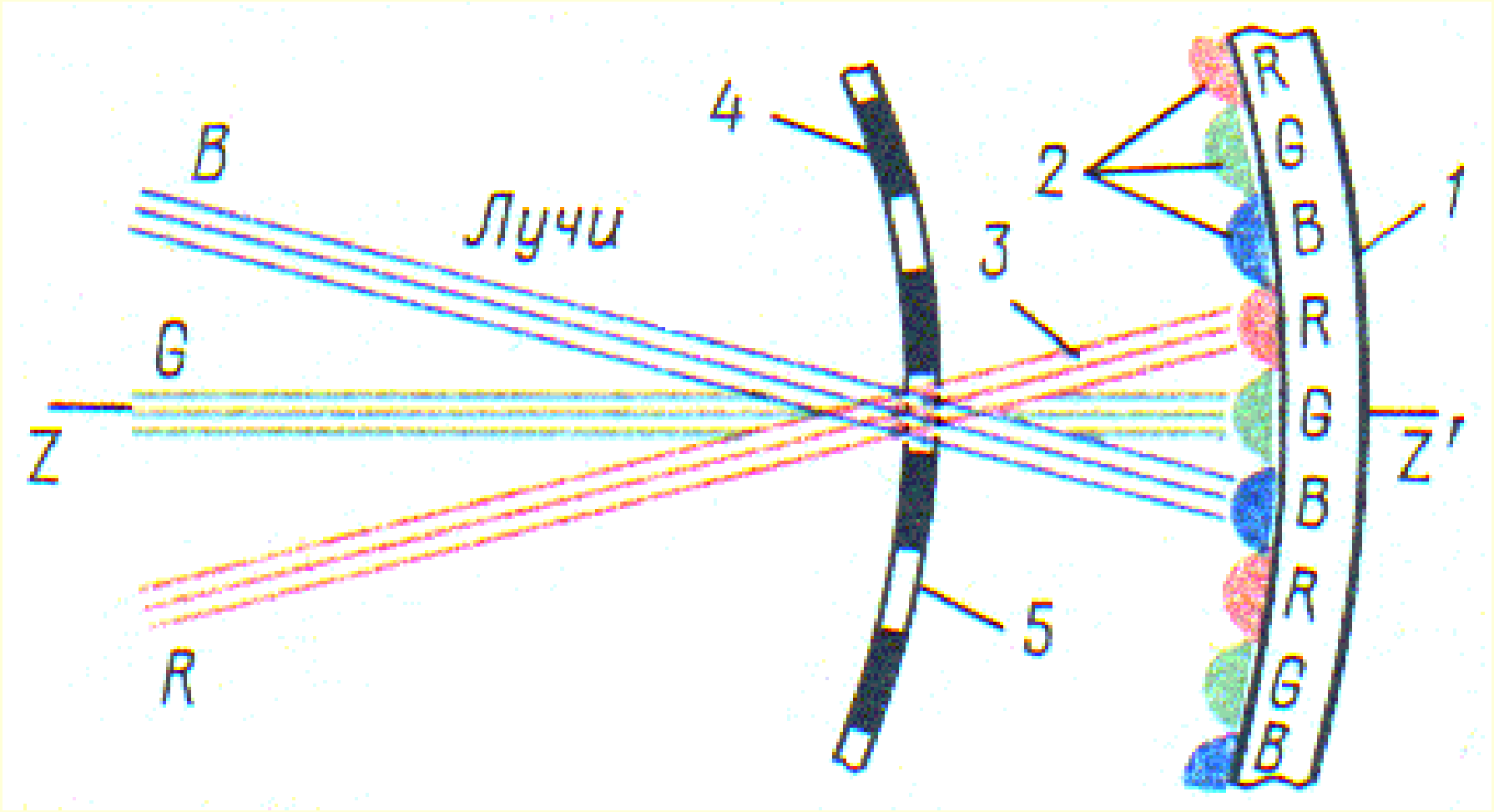
Электронно-лучевая трубка (кинескоп)

- Монохромные (черно-белые)
- Цветные
- Дельтавидные 3-х прожекторные
- Планарные 3-х прожекторные
- Однопрожекторные (хроматроны)
- Со сферическим экраном
- С цилиндрическим экраном
- С плоским экраном и т .д.

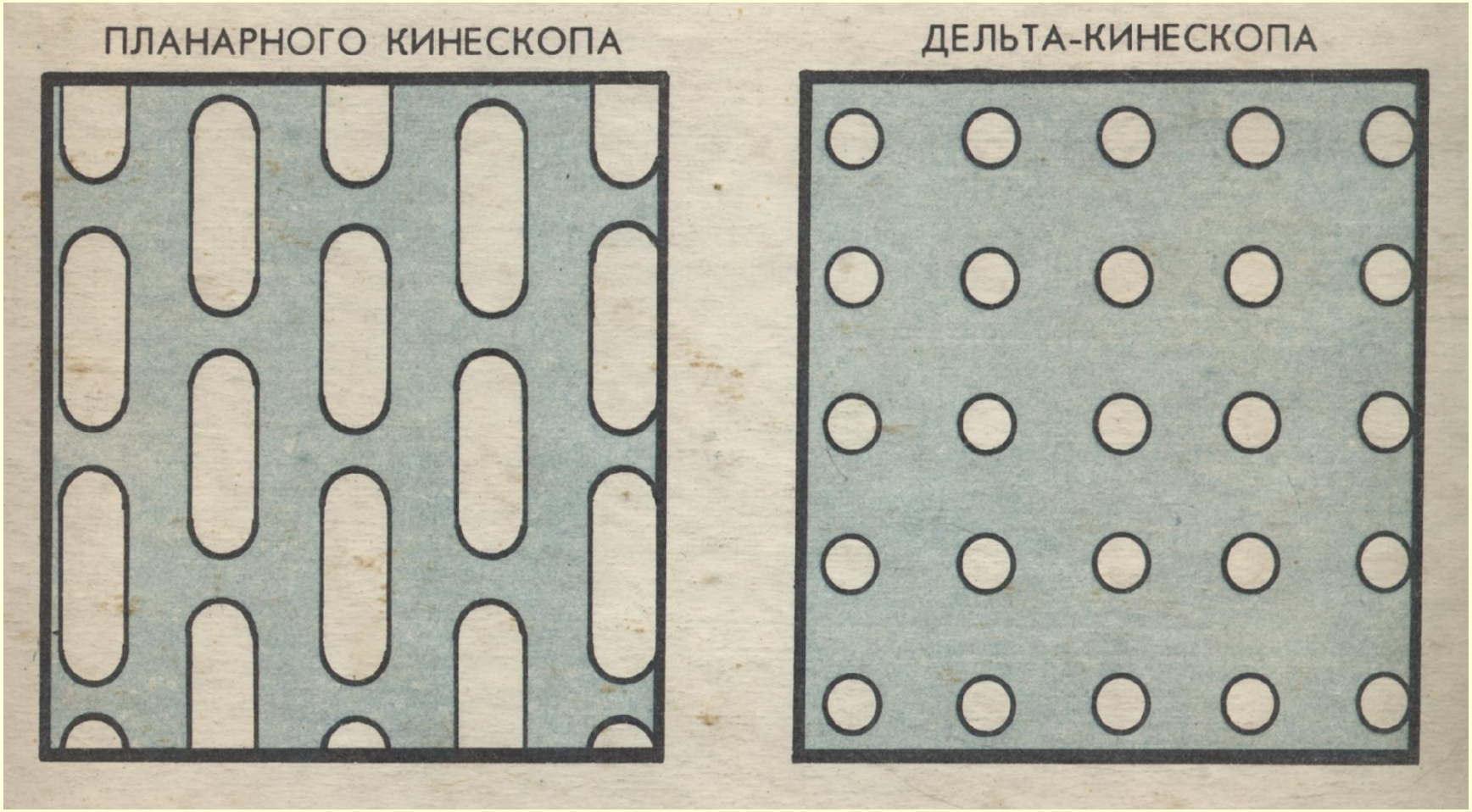
Цветной кинескоп, электронный прожектор, рис.8.1.



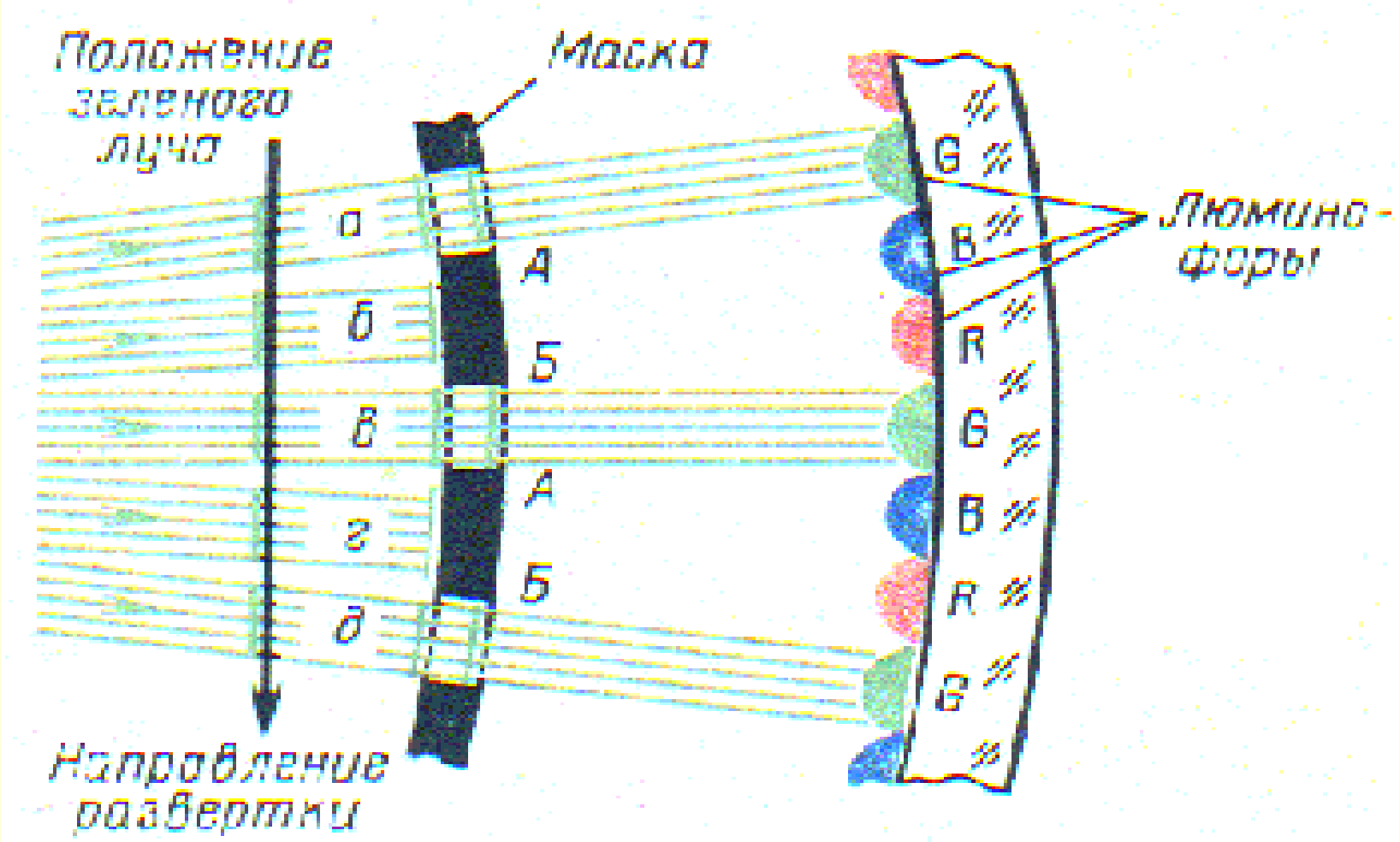
Цветной кинескоп, фокусирующая теневая маска, рис.8.2



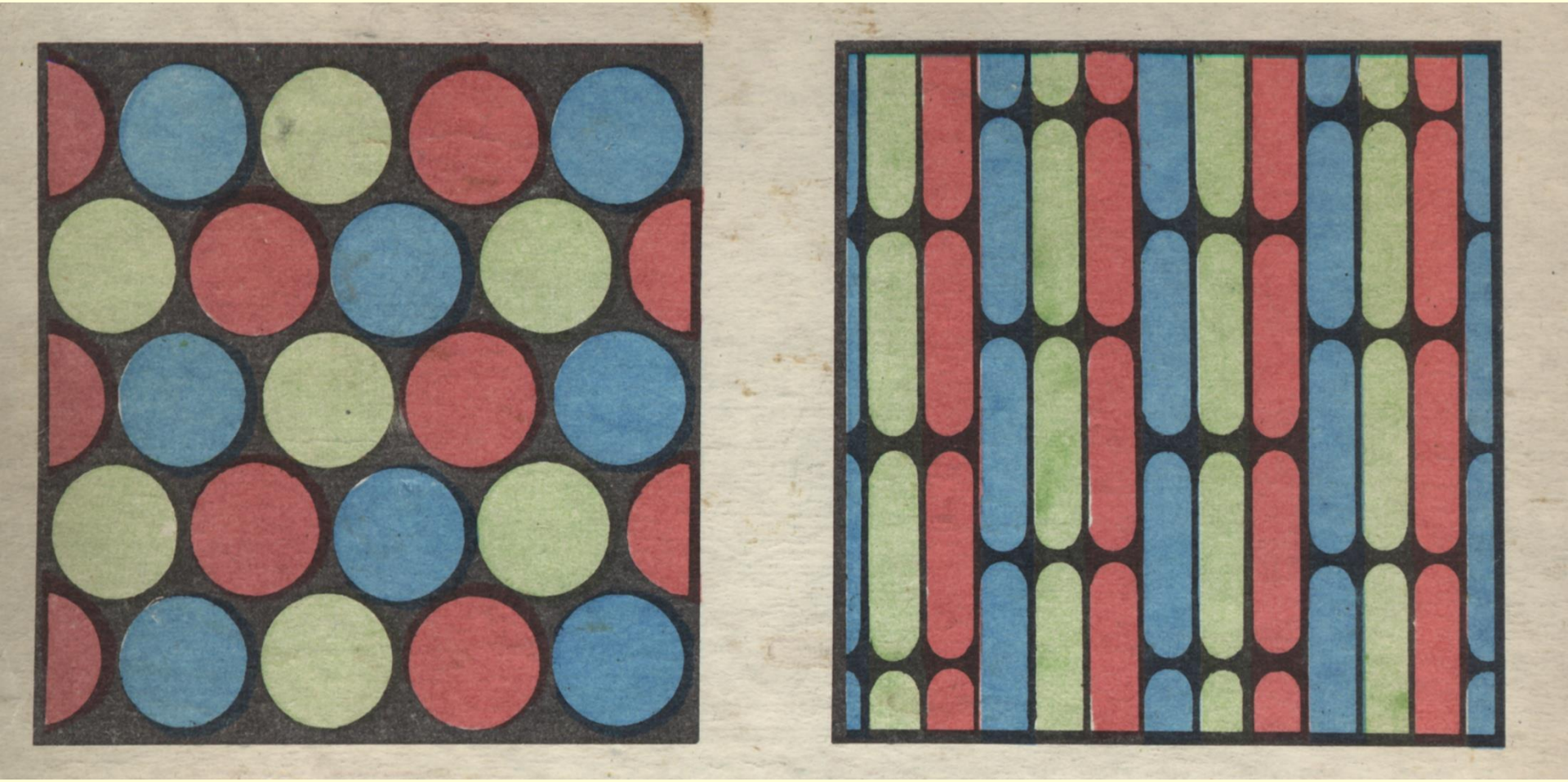
Структура теневой маски, рис.8.3.



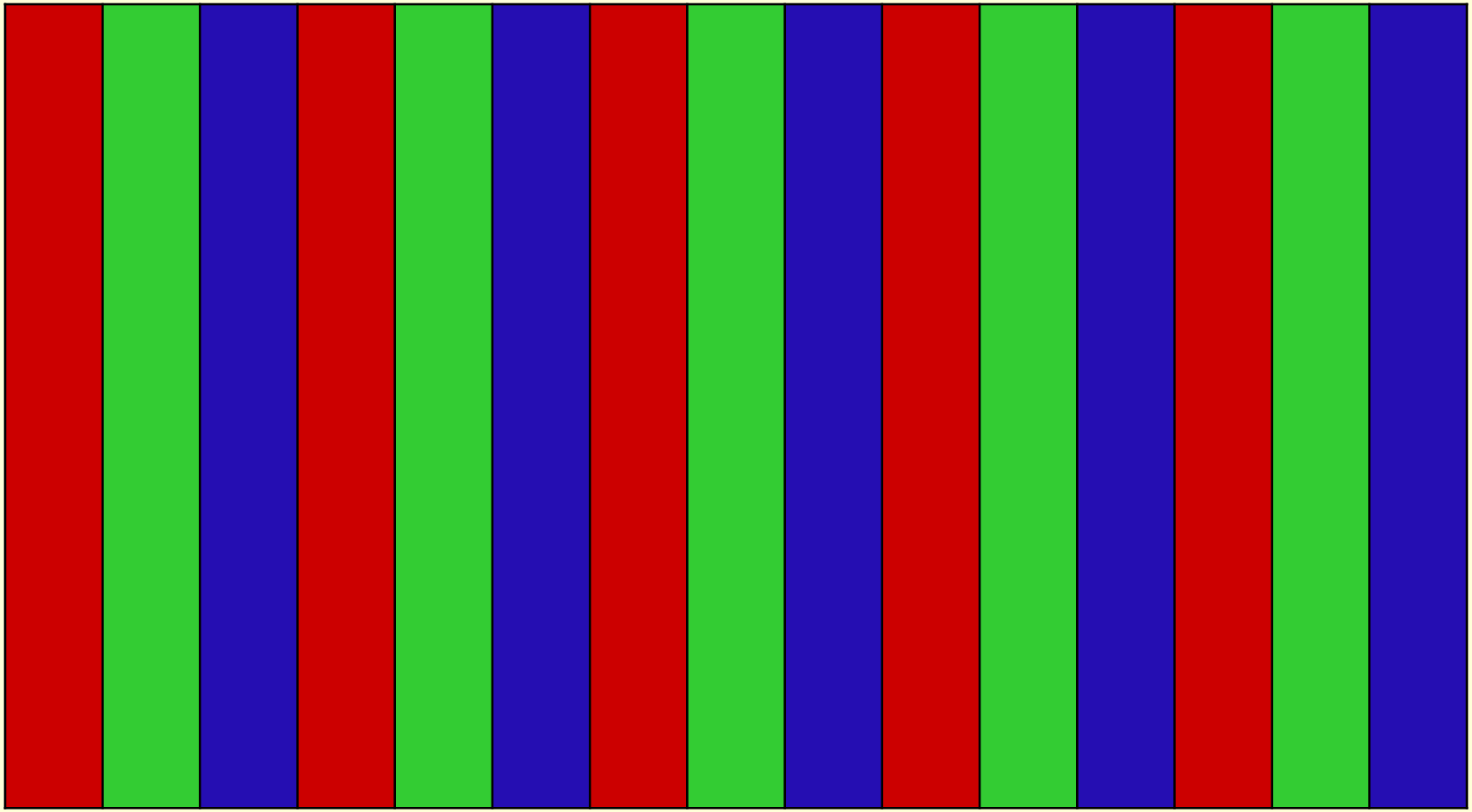
Эффективность теневой маски, рис. 8.4



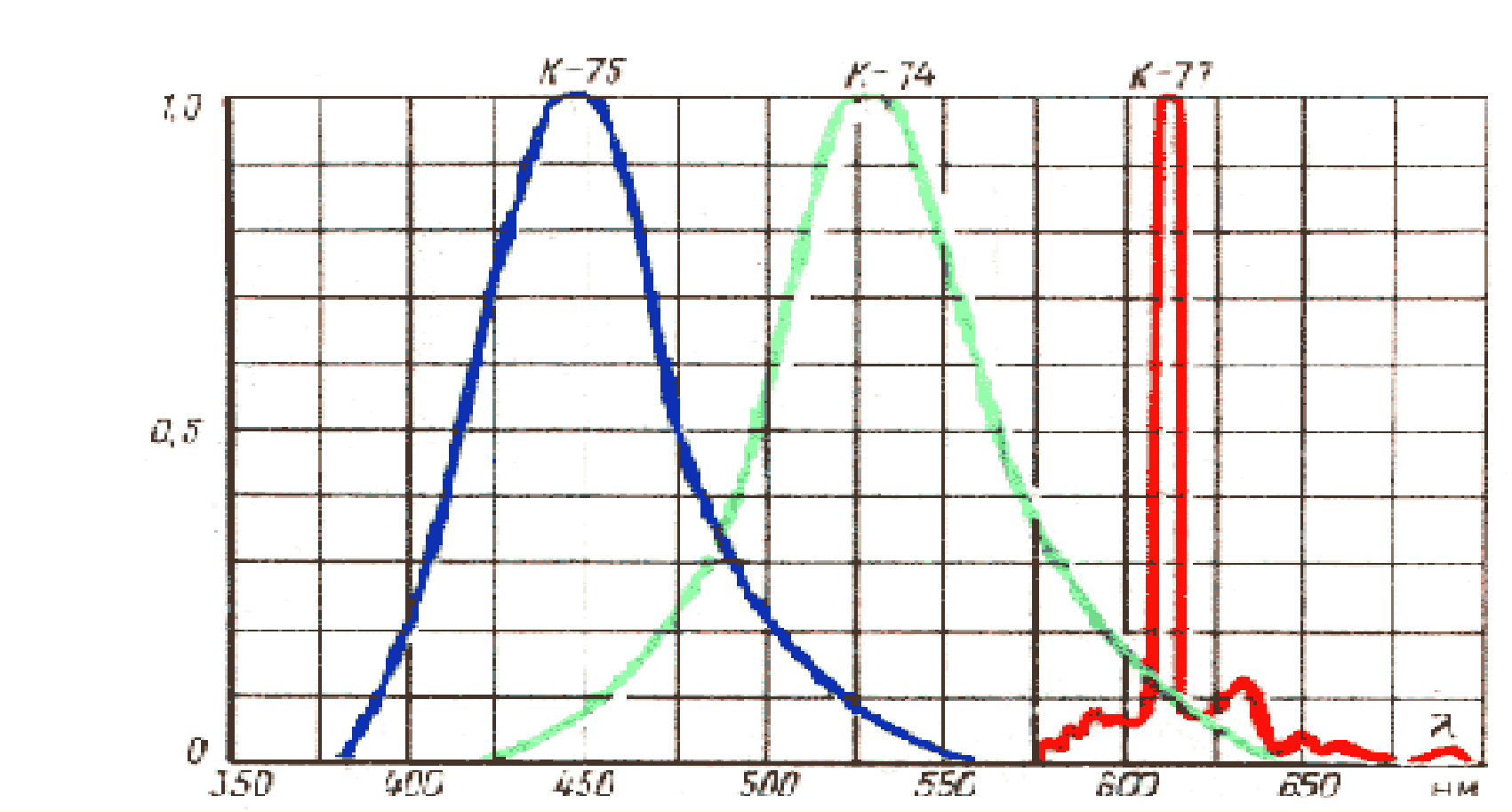
Структура люминофоров на экране масочного кинескопа, рис.8.5



Стуктура люминофоров тринитрона и планарного кинескопа, рис.8.6



Спектральные характеристики излучения люминофоров ЦТ кинескопа, рис.8.7



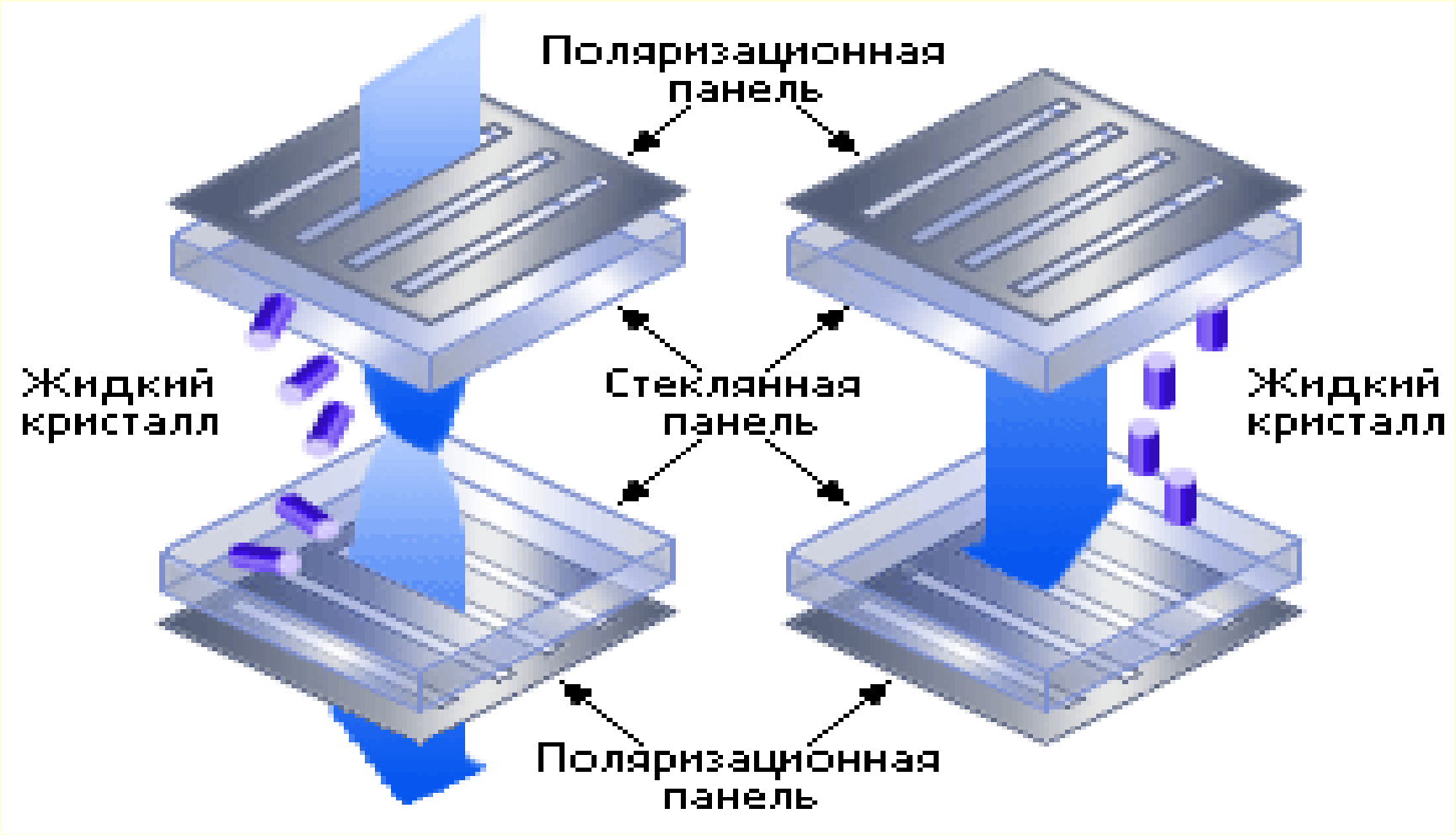
Координаты цветности основных цветов $R_пG_пB_п$ и опорного белого С

Цвет	Координаты цветности	
	x	y
Красный R	0,670	0,330
Зеленый G	0,210	0,710
Синий B	0,140	0,080
Белый C	0,310	0,316
Белый E (равно-энергетический)	0,333	0,333

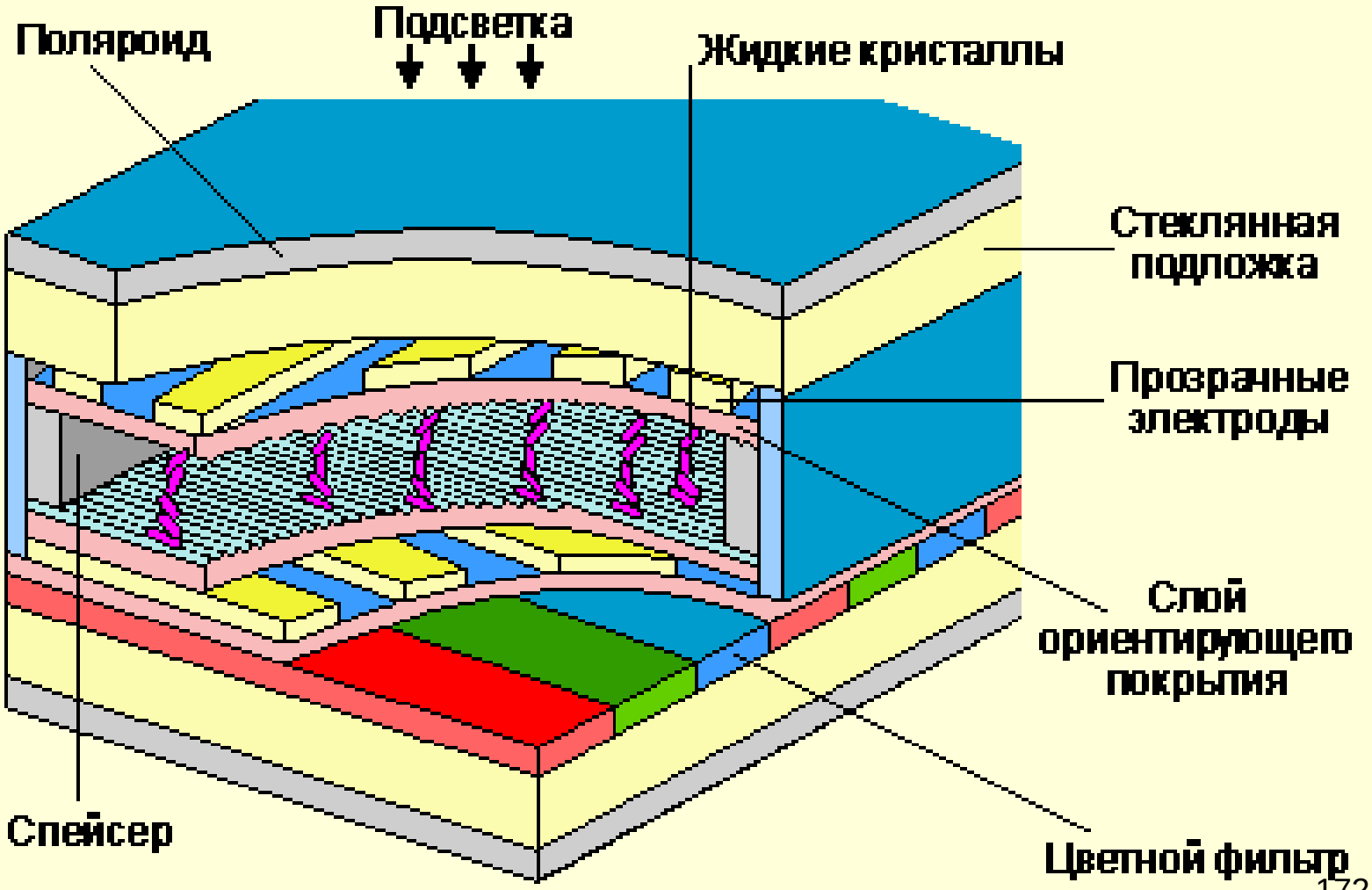
Жидкокристаллические мониторы (LCD)

- Принцип работы основан на эффекте поляризации светового потока
- Два скрещенных поляроида представляют собой оптический затвор
- ЖК под действием управляющего напряжения сигнала изображения поворачивает плоскость поляризации проходящего светового потока, управляя прозрачностью оптического затвора.

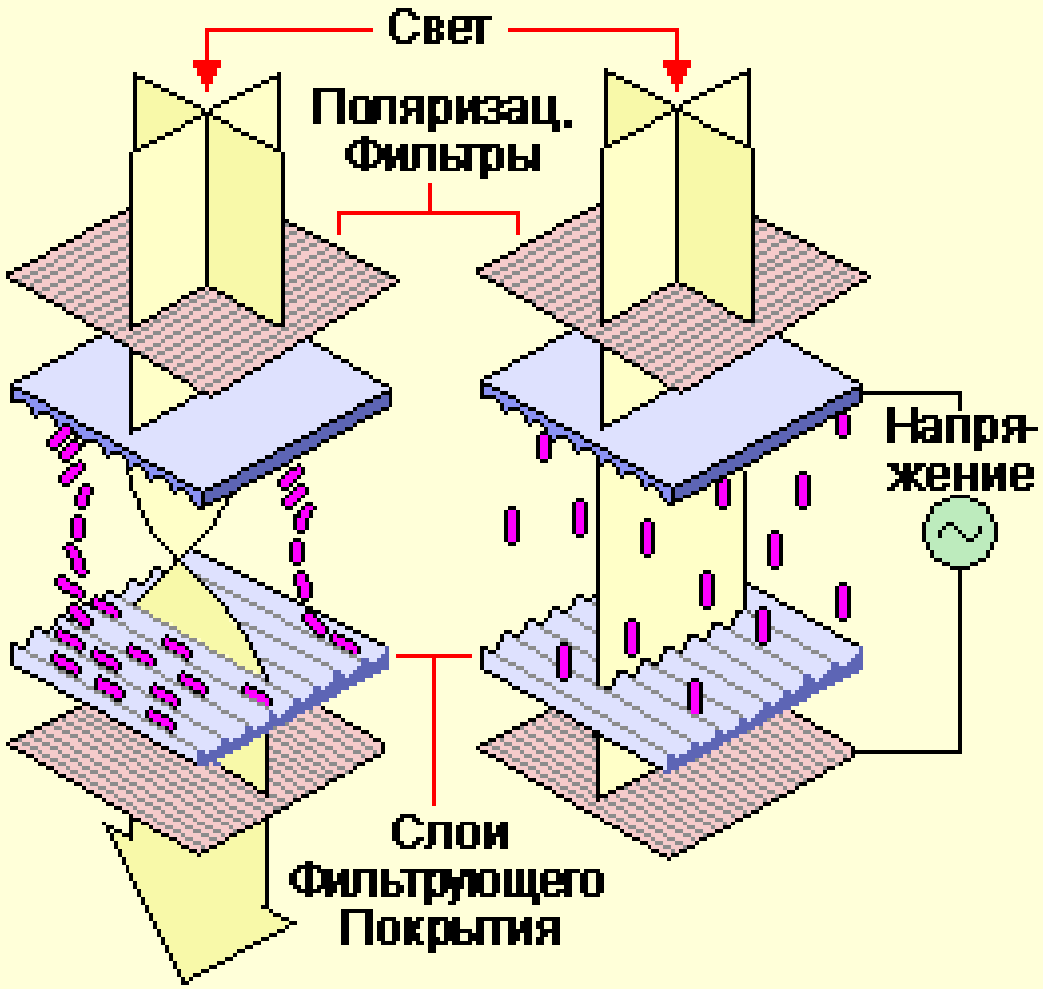
Жидкокристаллический монитор (LCD). ЖК-ячейка, рис.8.8



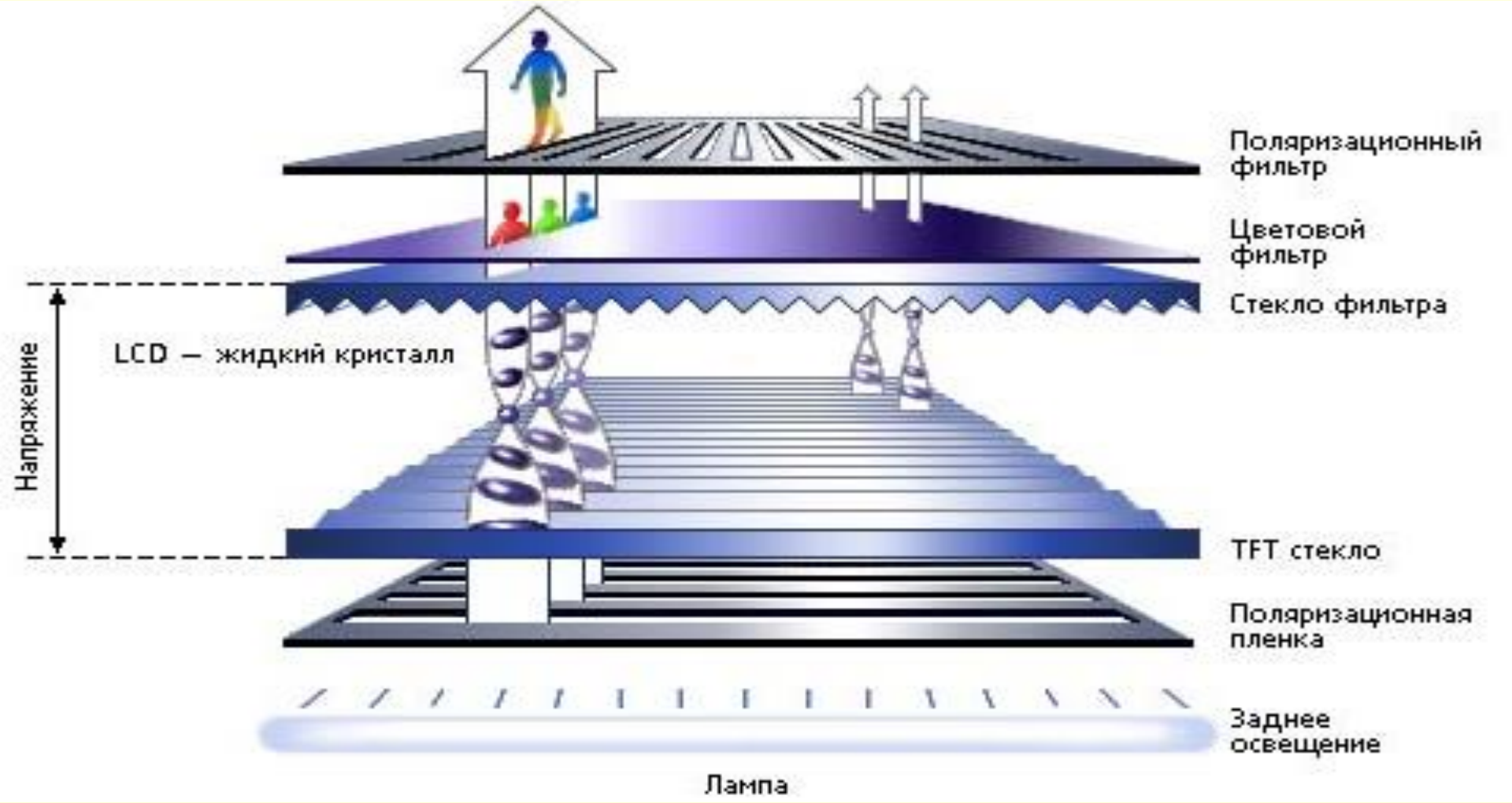
Жидкокристаллический монитор (LCD). Цветной пиксель, рис.8.9



Вращение плоскости поляризации света в ЖК – ячейке, рис.8.10

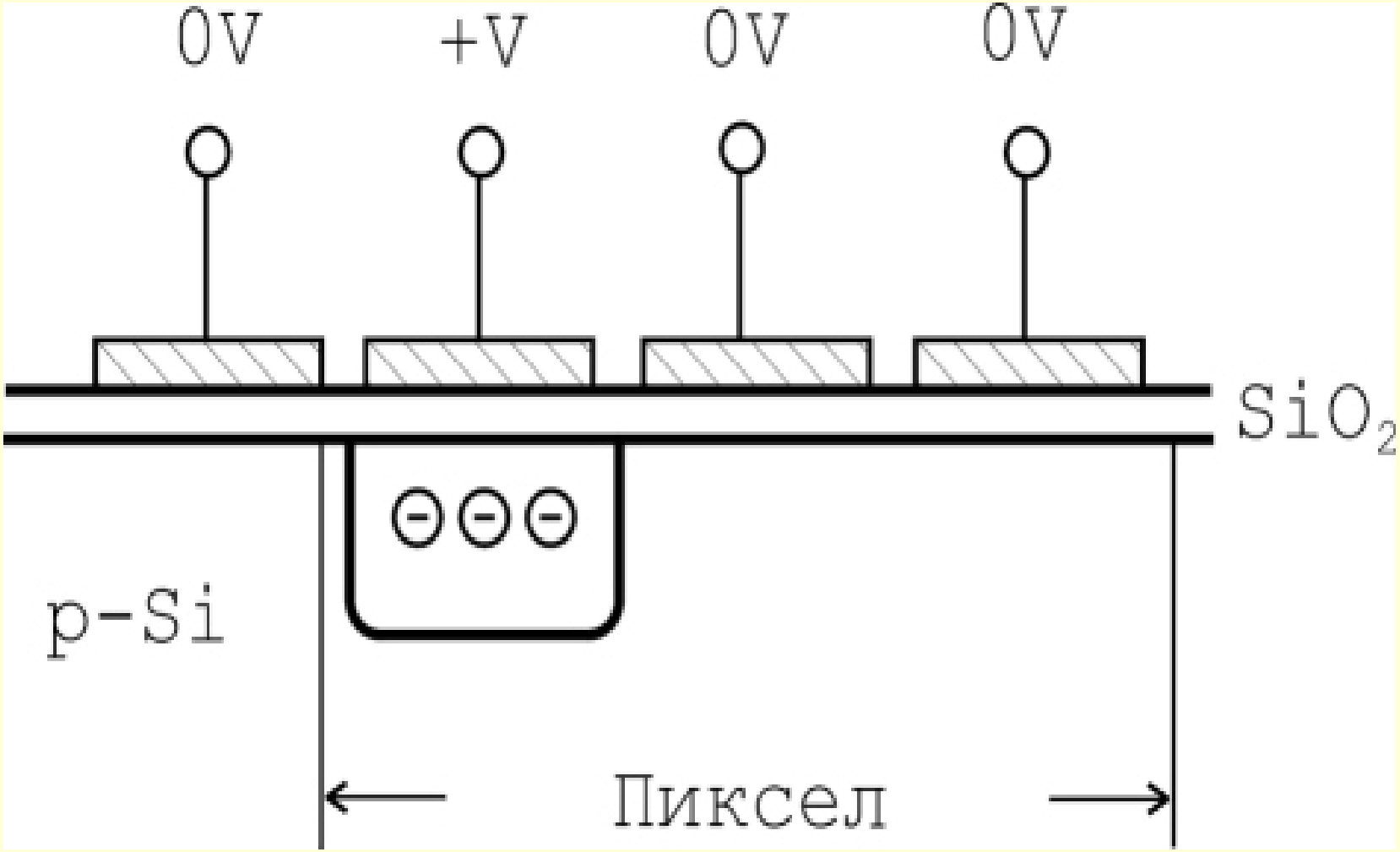


Конструкция LCD монитора, рис.8.11

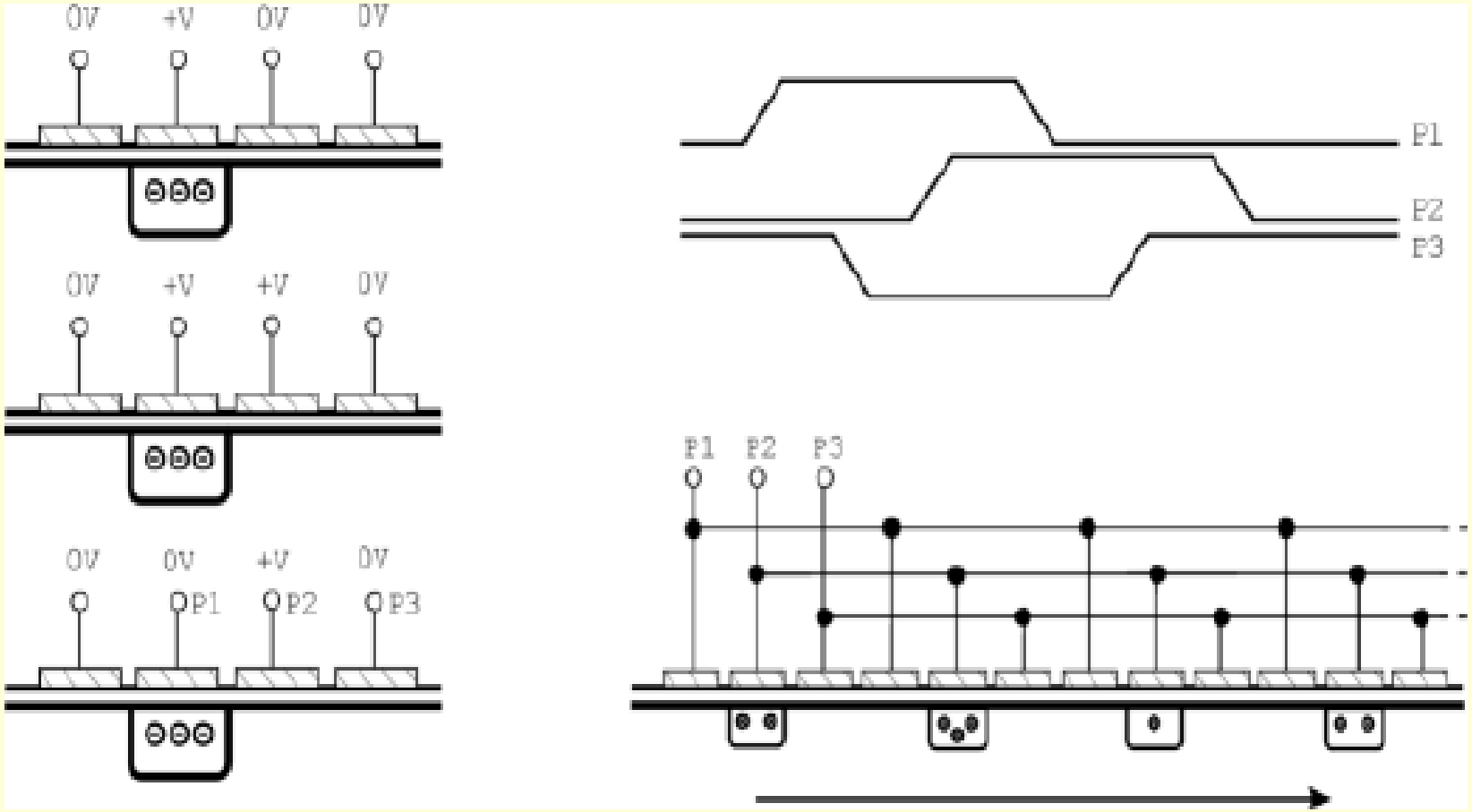


ПЗС

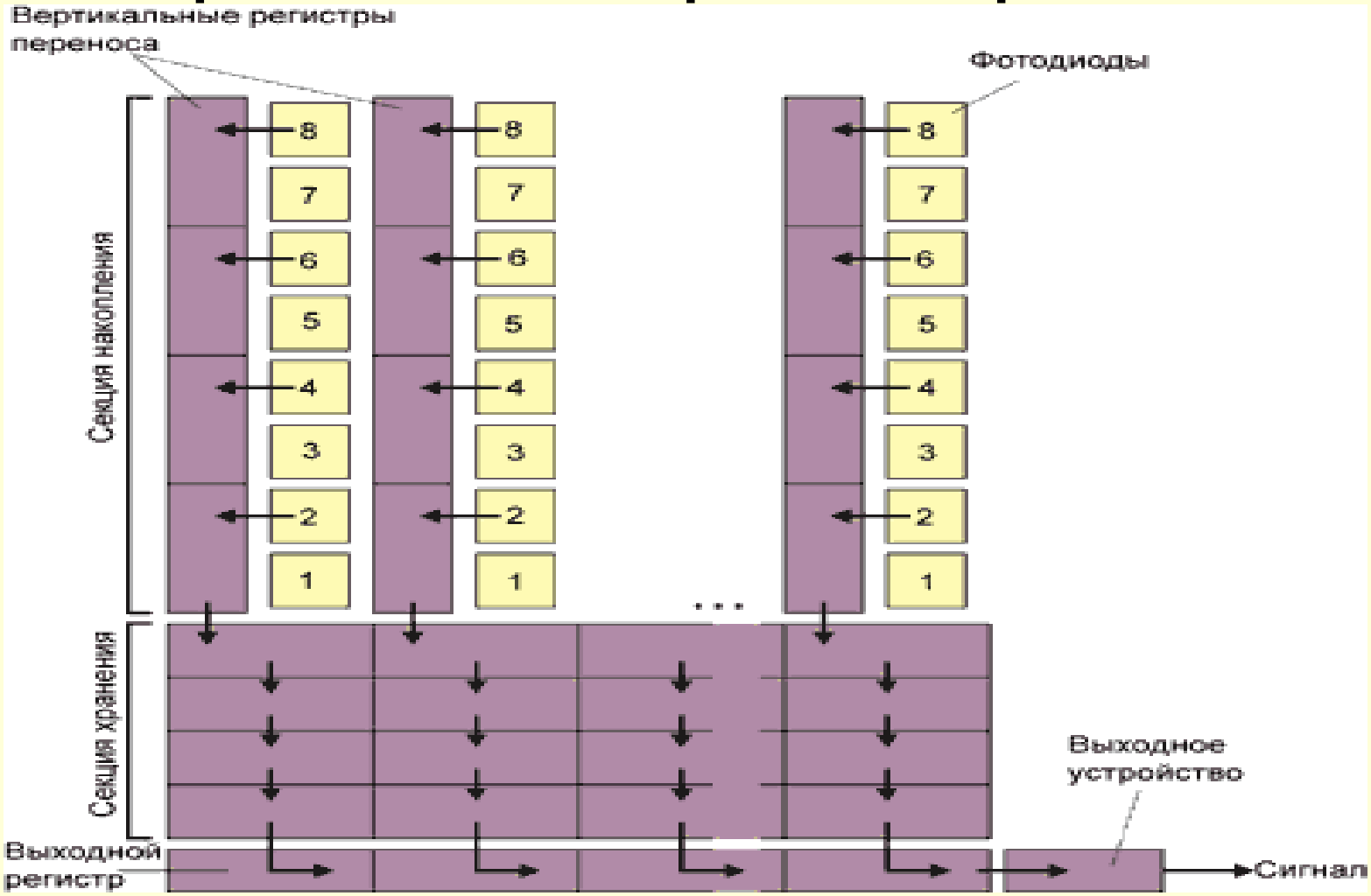
Ячейка ПЗС, рис.9.1



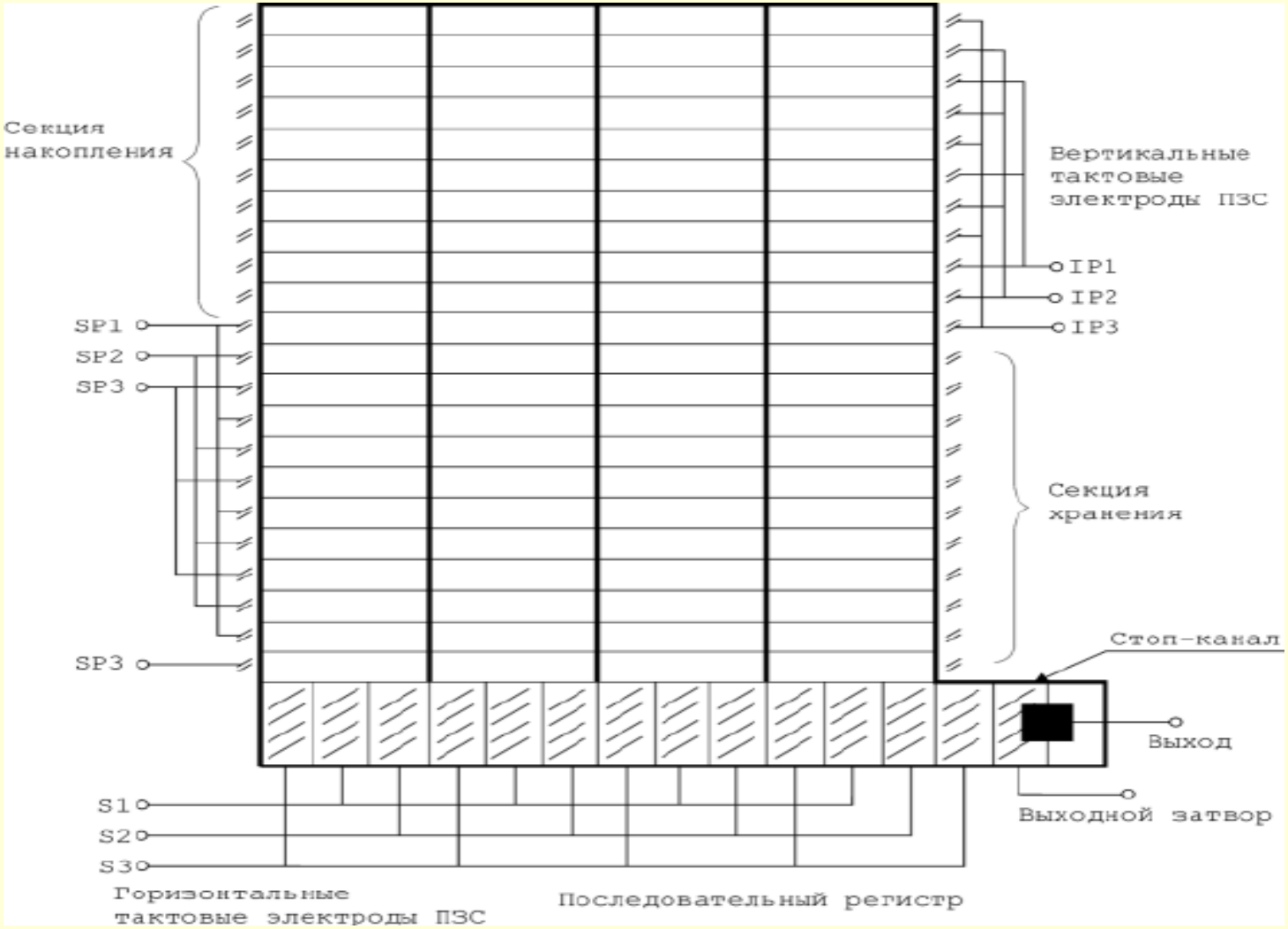
Принцип работы ПЗС, рис.9.2



ПЗС со строчно-кадровым переносом зарядов, рис.9.3

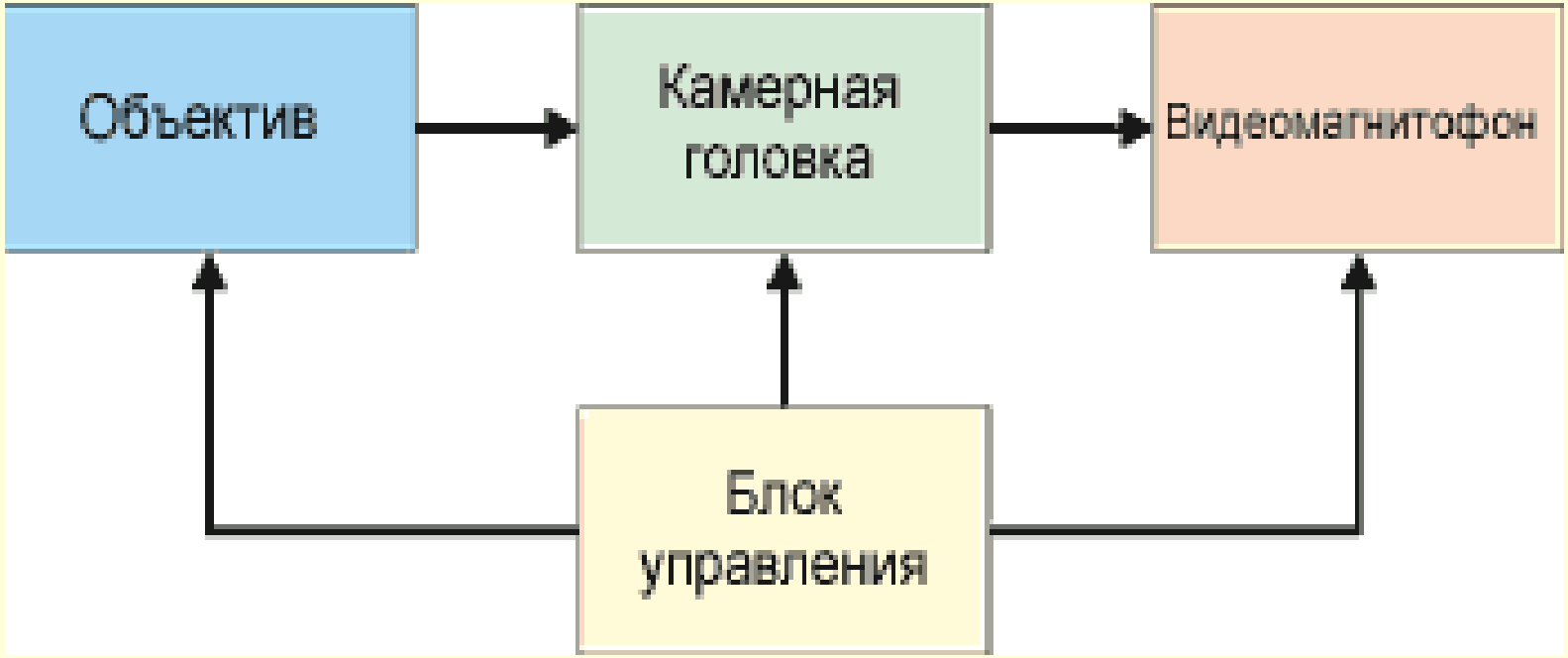


Структура ПЗС, рис.9.4

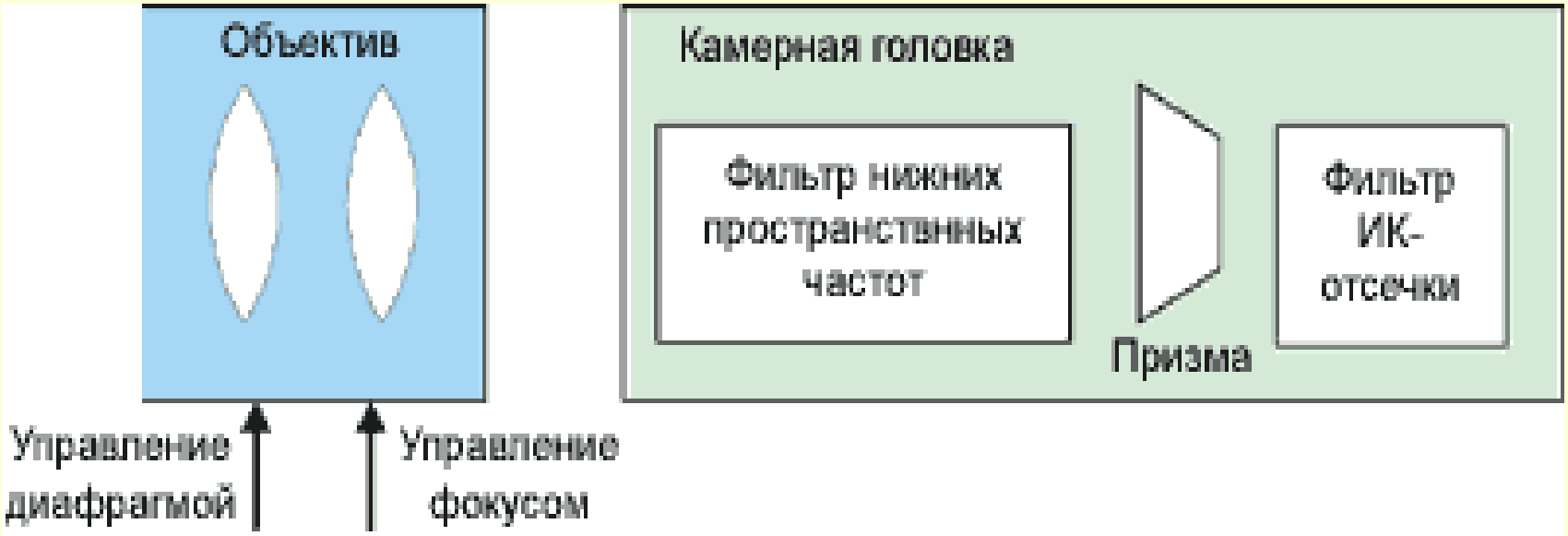


Видеокамера

Структурная схема камкордера, рис.9.5

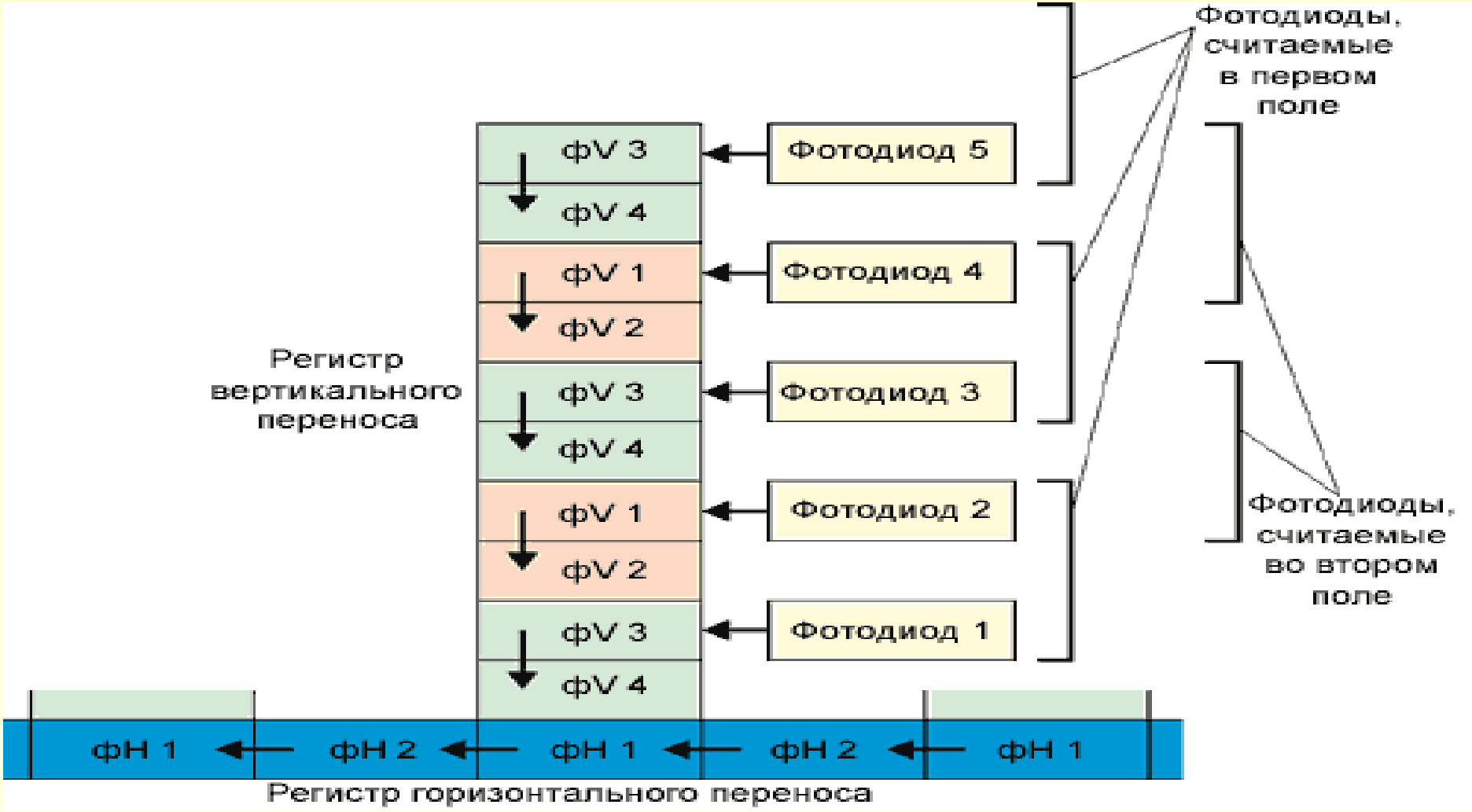


Оптическая часть ТВ камеры, рис.9.6

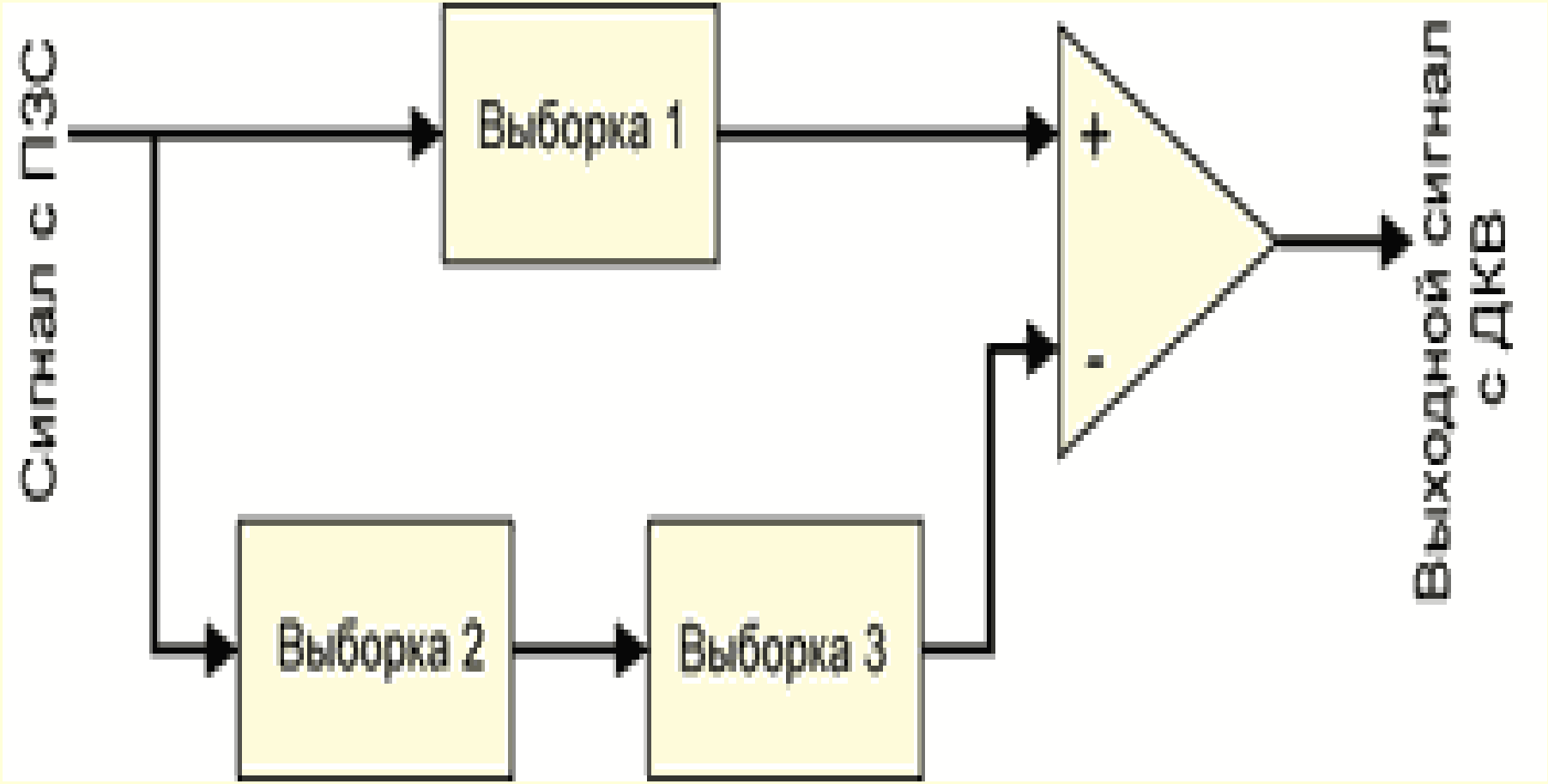


- **Основной блок видеокамеры - камерная головка (рис. 2), которая состоит из узла преобразования "свет-сигнал" и цифрового процессора обработки сигнала изображения**
- **Узел преобразования "свет-сигнал" и объектив составляют оптическую часть видеокамеры и представлены на рис. 9.6**
- **Сразу за объективом расположен фильтр нижних пространственных частот и светоделительная призма с цветными фильтрами, которая разделяет световой поток на три спектральные составляющие - красную (R), зеленую (G) и синюю (B) - по числу преобразователей изображения на ПЗС.**
- **Так как преобразователи на ПЗС имеют максимальную чувствительность в ИК-области спектра, а необходимо иметь кривую спектральной чувствительности камеры, близкую к кривой чувствительности глаза, то в оптическую часть камеры входит фильтр ИК-отсечки**

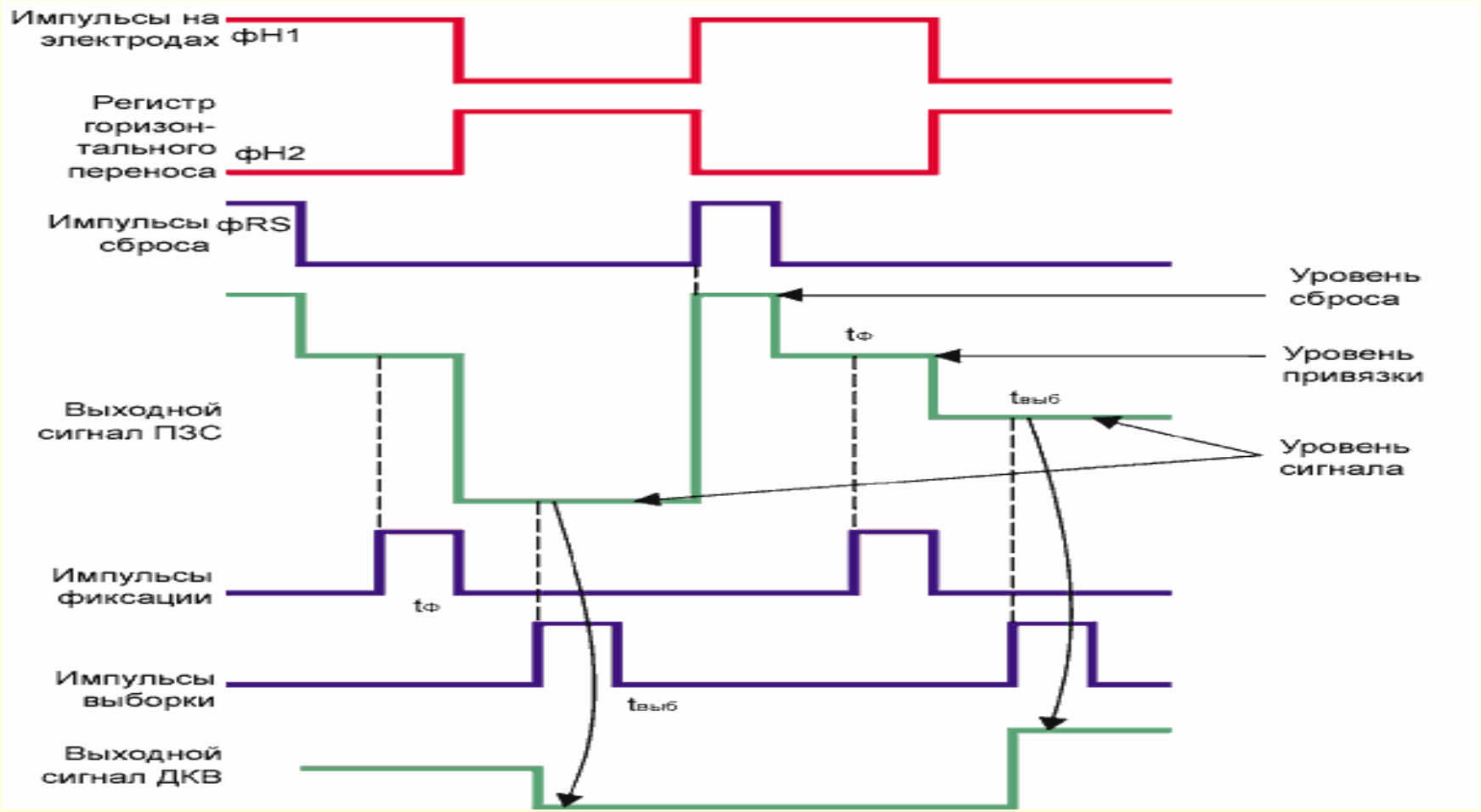
ПЗС матрица в режиме считывания по полям, рис. 9.7



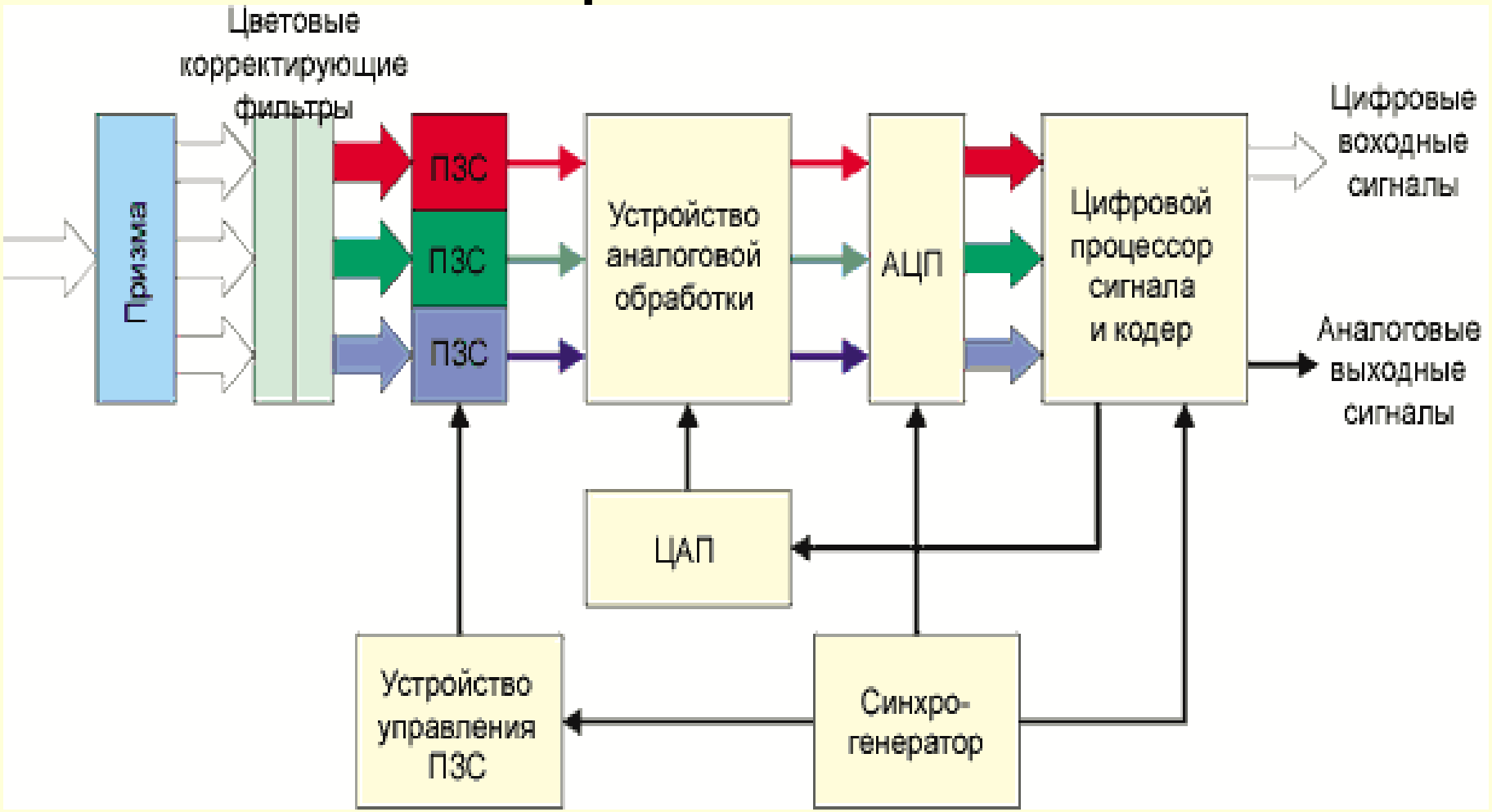
Двойная коррелированная выборка, рис.9.8



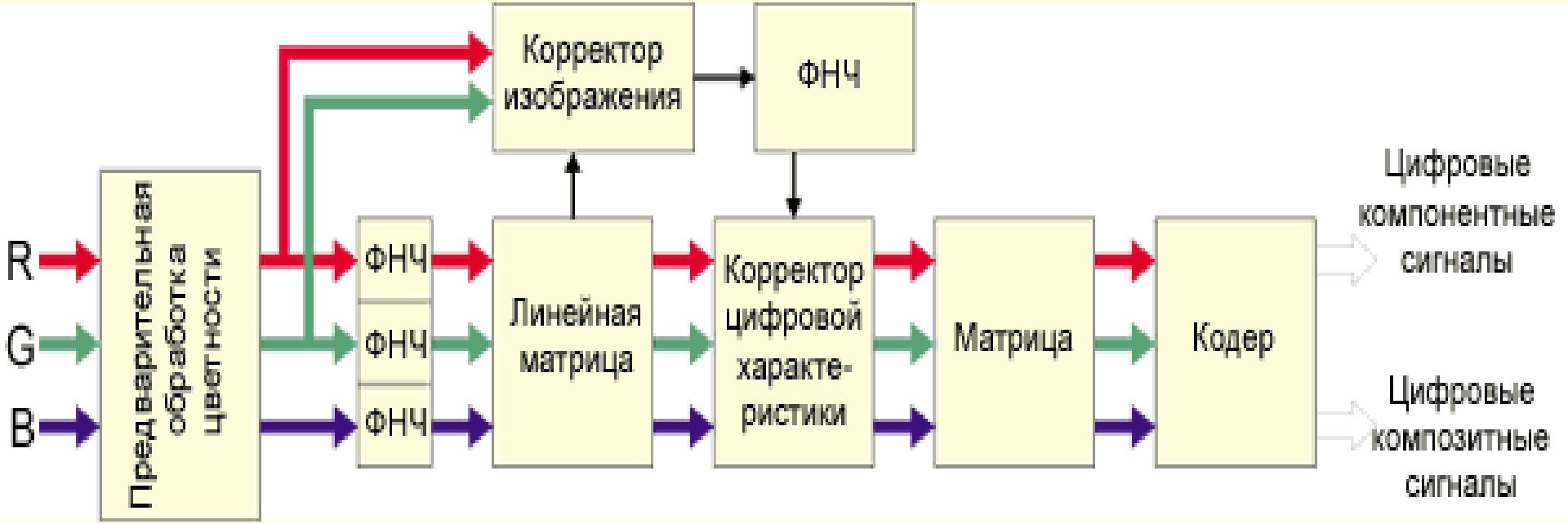
ПЗС. Принцип работы ДКВ, рис.9.9.



Канал изображения ТВ камеры, рис.9.10



Цифровой процессор обработки ТВ сигнала, рис.9.11



Видеокамеры

- Первые цифровые камеры формата Digital-8 фирмы Sony появились в1999г.
- Преимущества цифровой съемки играют решающую роль в дальнейшем распространении цифровых видеотехнологий на рынке.
- Широкое распространение достигнуто за счет снижения некоторых параметров качества изображения в данных устройствах.

Оптические диски

Blu-ray

- BD — Blu-ray Discs диск синего луча — (имеется в виду цвет излучения лазера, используемого для записи и воспроизведения информации на оптический диск).
- В группе основателей — пятнадцать фирм из Японии, США, Европы и Южной Кореи, а всего в BD-ассоциацию входит более семидесяти фирм.

HD DVD

- HD DVD, High Definition Digital Versatile Disc (цифровой видеодиск высокого разрешения).
- Разработчики альтернативного стандарта— корпорации Toshiba и NEC, и весь DVD-форум.

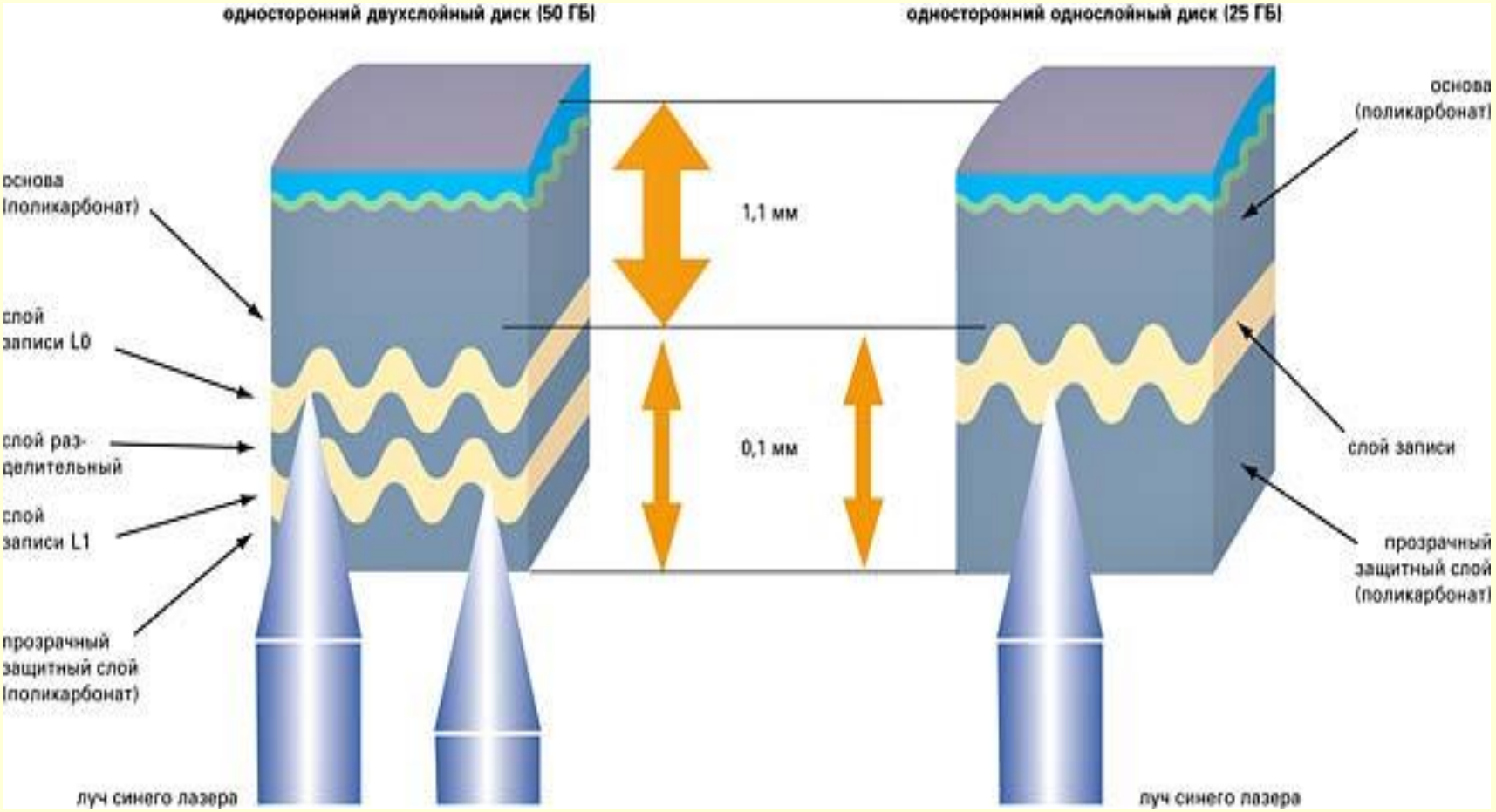
BD и HD DVD

- Стандарты записи дисков BD и HD DVD похожи
- Оба носителя – оптические диски диаметром 12 см, записываются сине-фиолетовым лазером с длиной волны 405 нм и вмещают большее количество видеоинформации, чем обычный диск DVD.

BD и HD DVD

- Основное различие стандартов состоит в следующем:
- BD использует новую структуру диска и новую систему записи
- HD DVD сохраняет основные характеристики широко распространенной DVD-технологии

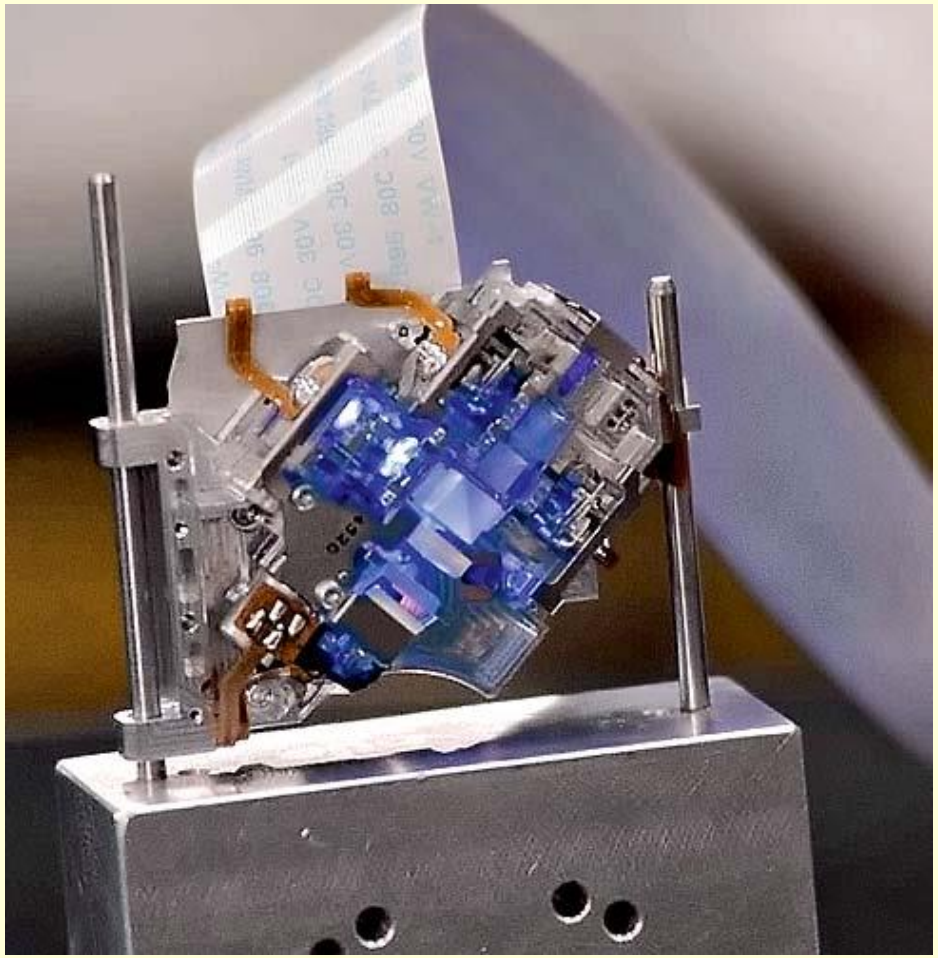
Отличия структуры дисков Blu-ray разной емкости, рис.10.1



Один из первых вариантов диска Blu-ray компании Sony (упакован в защитный картридж) 10.2

Один из первых образцов узла лазерной головки для Blu-ray, рис. 10.3

Трехлазерная головка Philips с записью и воспроизведением на дисках Blu-ray, DVD и CD, рис. 10.4



BD

- В формате BD применен коротковолновый сине-фиолетовый лазер с уменьшенным диаметром пятна от лазерного луча и повышенной числовой апертуры объектива с 0,6 (как у традиционных дисков DVD) до 0,85
- Площадь пятна лазерного луча сократилась до одной пятой от площади пятна в DVD-дисках, что позволяет получить питы меньшего размера.

BD

- Но увеличение числовой апертуры приводит одновременно и к большему влиянию наклона диска или изменения угла наклона оптической оси лазерного луча на вероятность попадания лучей в питы соседней дорожки.

BD

- Чтобы уменьшить эту зависимость, разработчики уменьшили толщину защитного слоя, который покрывает записывающий слой, до 0,1 мм.
- Так как в более тонких дисках перекрестные помехи меньше, то и допустимая погрешность по наклону для дисков BD получается сравнимой с аналогичной погрешностью для типовых дисков DVD
- У диска с защитным слоем в 0,1 мм, кроме того, увеличивается емкость

BD и DVD

- Стандарт BD и существующие стандарты DVD серьезно отличаются друг от друга (по структуре диска и по конструкции оптической считывающей головки)
- Воспроизведение стандартных дисков DVD на рекордерах BD невозможно
- Относительно высокая стоимость оптических головок для рекордеров BD и сложность изготовления самих дисков тормозят их широкое распространение