9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАССЕИВАТЕЛЕЙ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ



В предыдущем разделе и ранее в разделе 2 мы уже рассмотрели действие рассеивателей на примере их использования для размытия структуры ряда линейных люминесцентных ламп (ЛЛ) при освещении ими прозрачного располагаемого объекта (рис. 9.1), на поверхности рассеивателя Р. Ряд ЛЛ будет не периодическое видим, если светораспределение на поверхности Р будет иметь контраст T не более 2,5%, что получим, если для *l* будет выполнено следующее условие:

$$\ell \sim t \sqrt{-\left(\frac{\ln T}{\pi^2 k^2}\right)} \tag{9.1}$$

при $k \sim 0,1$ $T \sim 0,025$ для рассеивателя в виде молочного стекла $\ell=5t$.

Следует обратить внимание на то, что контраст по освещенности T_E и контраст по яркости T_B не одно и тоже для реальных рассеивателей. Например, при $T_E \approx 0.02$ для молочного стекла (MC) T_B может достигать значения до 0,5. В качестве примера можно привести тот факт, что чем выше наблюдатель над «рябью» водной поверхности, тем лучше видно дно водоема. Иногда это также объясняется не идеальностью рассеивателя, под которым принято понимать такой рассеиватель, у которого каждый участок рассеивает световой поток с минимальными потерями И К равномерно В пределах некоторого телесного угла. таковым приближаются ЛР, но о них мы поговорим ниже.

Свойство размывать структуру изображения используется в устройствах фокусировки – в видоискателях фотоаппаратов.

В ОУ рассеиватели типа МС обычно используются для выравнивания светораспределения за счет размытия изображения спирали лампы – увеличители, проекционные установки и пр.

Однако, роль МС в качестве рассеивателя можно интерпретировать и как вторичный источник света (рис. 9.2). Освещенность поверхности МС можно вычислить по формуле:

$$E \sim \tau \pi B Sin^2 \varpi'$$

где $tg\varpi' = \frac{\ell'}{2d}$; $\ell' = \ell \cdot \beta_{\kappa}$; $2dtg\varpi' = \ell \cdot \beta_{\kappa}$, ℓ и ℓ' размеры СТ источника

света и его изображения при отсутствии рассеивателя.



Рис. 9.2

Яркость МС *B*_P, если принять МС за ламбертовский рассеиватель, определится по формуле:

$$B_{\rm P} = (E/\pi)\rho_{\rm s}$$

где **р** – коэффициент рассеяния MC.

Для определения размера *L* вторичного источника, определяющего в этом случае апертурную диафрагму ОУ, имеем формулу:

$$\boldsymbol{L} = 2dSin(\boldsymbol{\sigma}'). \tag{9.2}$$

Особенно это важно в микроскопии, где $\beta_{\kappa} >>1$, так как обычно $\ell \sim 3$ мм, $D_a \sim 20 \div 27$ мм $\rightarrow \beta_{\kappa} \sim 7 \div 9^x$ Так как $q \sim \beta_{\kappa}^2 = 49 \div 81^x$ и изображение СТ вытягивается вдоль оси на 150÷240 мм. Но самое главное, компоненты ОУ – коллектор и конденсор при этом должны быть многолинзовыми и часто нетехнологичными. ОУ микроскопа, оптическая схема которого будет включать коллектор $\varphi_{\kappa on}$ и конденсор φ_{κ} , может строиться по схеме, представленной на рис. 9.3, рассеиватель МС определит апертурную диафрагму АД конденсора.

Очевидно, *B*_M<*B* яркости лампы.



Рис. 9.3

Еще более эффективно использовать в качестве рассеивателя линзовые растры (ЛР).



Рис. 9.4

На рис. 9.5 (а) приведено изображение поверхности растрового рассеивателя, а на рис.9.5б изображение мультиплицированного источника света в плоскости апериурной диафрагмы (АД) ОУ по рис. 9.4.



Рис. 9.5

 $q=(f'_p/f'_{\kappa o \pi})^2 <<1$ $E \sim \tau \pi B N Sin^2 \sigma'_p$ $Sin \sigma'_p = \ell'/2 f'_{\kappa}$ N - общее число ЛЭР. При

$$\ell' = X \quad N \operatorname{Sin}^2 \sigma'_p = \operatorname{Sin}^2 \sigma'. \tag{9.3}$$

Величина «*ℓ'/Х=с»* определяет множитель некогерентности Рождественского.

Светораспределение в силу высокой контрастности освещающих пучков имеет вид подобный светораспределению в спектре Фраунгофера дифракционной решетки, сглаженного за счет конечных размеров источника света. Огибающая светораспределения в идеальном случае будет иметь вид трапеции (рис. 9.6).

Размер освещаемого поля

$$2x = 2f'_{\kappa} tg\sigma'_{p} + \ell\beta \qquad \beta = \frac{f'_{\kappa}}{f'_{\kappa o \pi}} \qquad 2x_{0} = 2f'_{\kappa} tg\sigma'_{p} - \ell\beta \qquad c = \frac{\ell\beta}{2f'_{\kappa} tg\sigma'_{p}} \qquad (9.4)$$



Рис. 9.6

В фотолитографии используют конструкцию из 2-х ЛР, так называемый сотовый конденсор (рис. 9.7).

В этом случае получается резкая граница освещаемого поля. Обычно полагают, что светораспределение по полю подчиняется закону



Рис. 9.7

 E_0 освещенность в центре освещаемого поля объекта.

В современных системах отображения изображения (СОИ) типа ЖК дисплей, в которых требуется подсветка, в оптической системе ОУ используется многократное рассеяние освещающих пучков. Система подсветки ЖК-дисплея может строиться по схеме, приведенной на рис. 9.1, но в "плоских" СОИ, например, для ноутбуков оптическая система ОУ подсветки чаще строится по схеме, представленной на рис. 9.8.

В качестве источника света обычно используется линейная люминесцентная лампа (ЛЛ), располагаемая с торца клина К, на нижней поверхности которого расположены центры рассеяния. Эти центры рассеяния выполняются в виде углублений круглой или прямоугольной



формы с рассеивающей нижней поверхностью (рис. 9.9 а, б).

Рядом с нижней поверхностью клина располагается рассеивающая белая поверхность Р1, рядом с верхней поверхностью клина располагается группа рассеивателей (3-4 рассеивателя) Р2, профили которых приведены на рис. 9.10.

a



Рис. 9.9

Рассеиватели имеют треугольный или пилообразный профили (рис. 9.10 а, б) или синусоидальный (рис. 9.10 в).



Рис. 9.10

Это рассеиватели с периодической структурой, они работают в паре и скрещены друг относительно друга (рис. 9.11 а, б) и именно они формируют требуемую зону видения.





Рис. 9.11

Рассеиватели с периодической структурой формируют периодической светораспределение. То и другое необходимо размыть и для этого вводят рассеиватель с хаотической структурой, например, с микросферами (рис. 9.12).

Такой рассеиватель работает в соответствии с теорией Ми, согласно которой радиусы *r* микросфер больше длины волны рассеиваемого излучения:

$$n - n_{cp} = \frac{\lambda}{\pi r} \tag{9.5}$$

 $r > \lambda$, и расстояния между микросферами больше λ , сферы расположены хаотично и здесь практически нет обратного рассеяния, что свойственно рэлеевскому рассеянию.



Рис. 9.12

10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕТОДИОДОВ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ.

Исследования показали перспективность замены в ряде случаев в ОУ, например, микроскопа лампы накаливания на СД белого свечения, что так же справедливо и для других ОП, например, для систем технического зрения (СТЗ). СТЗ обычно относят к классу макроскопов, работающих с большими полями зрения в пространстве предметов и небольшими увеличениями, тем не менее, принципы, используемые в ОУ макро- и микроскопов одинаковы, что позволяет рассмотреть их с единых позиций. На рис.10.1 приведены варианты схемных решений ОУ. Первые две схемы могут быть отнесены к ОУ как ближнего, так и дальнего действия (σ '=0) и в таком виде они могут представлять коллекторную часть ОУ микроскопов – рис. 10.1 (в), (г), (д), (е). В ОУ по рис. 10.1 (в), (г), (е) реализуется как критический метод освещения, так и метод освещения по Келеру.

В схеме по рис.10,1 (в) освещение по Келеру создается при введении в ход лучей рассеивателя, например линзового растра (ЛР), а в схеме по рис.10,1 (д) освещение по Клеру создается классическим способом – проектированием в зрачок изображения СТ светодиода. Обратим внимание на схему по рис. 10,1 (е), где одновременно используется не менее трех цветных СД (третий на схеме не показан), что позволяет варьировать спектральной характеристикой освещающих пучков. Смешивание цветов пучков в схеме происходит в волоконно-оптической шайбе, а так же возможен альтернативный вариант использования молочного стекла. ОУ по схеме (ж) разрабатывалось для использования в инвертированном микроскопе типа Биолам-П и имело апертуру освещения 0,5, а размер освещаемого поля 4 мм.



Рис. 10.1

Основные характеристики ОУ – создаваемая на объекте освещенность, ее светораспределение и спектральный состав, а также габариты (длина) ОУ во многом зависят от источника света – СД. Оценим значение величины L в схемах по рис. 10.1 (г), (д) при использовании в первой схеме СД У-164 Бл, а во второй У-337 Бл.

В Таблице приведены основные характеристики отечественных СД [177]. Примем, что диаметр апертурной диафрагмы ($D_{A,d}$) конденсора поз. 3 в обоих случаях равен 27 мм и с учетом того, что апертура освещающего пучка У-164 Бл - 2 σ = 8°, для *L* по схеме рис.10.1 (г) получим: *L* = $D_{A,d}/2Sin\sigma + S' == 49,8$ мм, а для схемы по рис. 10.1 (д), где компоненты 1÷2 – это линзы конденсора КОН-3 для *L* справедлива формула: *L* \approx

 $D_{AJ}/2tg\omega$, где ω – угловой размер CT (c') в пространстве изображений после компонента 1÷2, и при $\omega = 10^{\circ} L \approx 78$ мм. И так как теплового воздействия СД на объект не оказывает, то обе схемы получаются компактными.

На рис. 10.2 приведены изображения СТ различных СД, как белого, так и цветного свечения. Некоторые изготовители выводят электроды прямо на поверхность СТ (см. рис. 10.2 а, в, д, е). Особенно сильное влияние на форму СТ СД оказывают так называемые контактные



Рис. 10.2

площадки, имеющие размер порядка 90×80 мкм и расположенные слева и справа на СТ по рис. 10.2 (в) и определяющие форму СТ в виде "двутавра". Очевидно, СТ СД не может быть признано равноярким. Следует обратить внимание, что на поверхности СТ белого свечения обычно четко просматриваются желтые пятна на бело-голубом фоне. Отечественные СД белого свечения У-337 (рис. 10.2 а) и У-334 (рис. 10.2 б) обеспечивают достаточную равномерность светораспределения для микроскопии.

При этом СД У-337 (размер СТ 4,5 мм) легко обеспечивает получение освещаемого поля $10\div12$ мм, что позволяет работать со слабыми объективами увеличением $2,5\times$, а излучаемая им мощность светового пучка обеспечивает достаточную освещенность при работе с объективом $100\times$ увеличения, чего нельзя сказать о СД У-334 (размер СТ 2 мм), который рекомендуется использовать при работе с объективами от $4\times$ до $40\times$ увеличения. По спектральному составу излучения, о чем подробно будет сказано ниже, их целесообразно использовать в СТЗ, а для медикобиологических задач наиболее подходит СД фирмы LUXEON (рис. 10.2 е), но по размеру СТ ($2,3\times2,3$ мм) он при работе с объективом 4^{\times} увеличения не обеспечивает требуемого размера освещаемого поля (5 мм и более), поэтому его следует использовать в схемах (по рис. 10.1) с рассеивателем.

В дальней зоне для схем по рис. 10.1 (б), (в) светораспределение будет определяться светораспределением по поверхности СТ, что также имеет место в схемах по рис. 10.1 (г, д), если в ходе лучей нет рассеивателя. Укажем на целесообразность расположения СТ в апланатических точках преломляющей поверхности колпака, а в случае построения ОУ дальнего действия из одиночного СД целесообразно иметь профиль преломляющей поверхности эллиптическим, при этом расходимость светового пучка ω определится в основном размером CT: $\omega \sim c/f'$, где $f'=nb^2/(n-1)\cdot a$, где $f' = nb^2/(n-1)\cdot a$ фокусное расстояние колпака, *n* – показатель преломления материала колпака, a, b – полуоси эллипса, эксцентриситет поверхности e=1/n, величина *b*²/а определяет радиус кривизны при вершине эллипса. Эллиптическая поверхность колпака является частным случаем класса анаберрационных поверхностей, описываемых уравнением четвертой степени, сечения которых меридиональной плоскостью определяют кривые, имеющие общее название «овалы Декарта». В.Н Чуриловским получено уравнение такой кривой:

$$n\sqrt{y^{2} + (S - x)^{2}} + \sqrt{y^{2} + (S' - x)^{2}} = -S' - nS$$
(10.1)

Построить профиль такой кривой по точкам можно после решения уравнения:

$$ay^{4} + by^{2} + c = 0,$$
 где

$$a = (n^{2} - 1), \ b = 2B(n^{2} - 1) - 4n^{2}A^{2}, \ c = B^{2} - 4n^{2}A^{2}(S - x)^{2},$$

$$A = nS + S', \ B = A^{2} + n^{2}(S - x)^{2} - (S' - x)^{2}, \text{ откуда}$$

$$y = \pm \sqrt{\frac{\left(-b \pm \sqrt{b^{2} - 4ac}\right)}{2a}}$$

Задаваясь значениями абсциссы x, из последнего уравнения получим ординату у. Современная технологическая база позволяет реализовать практически любой профиль преломляющей поверхности колпака СД. В настоящее время уделяется большое внимание конструкции колпака СД, зеркально-линзовой который часто является системой. имеет Френелевский профиль или профиль комбинированной поверхности. Если система изопланарна, то для учета действия всех точек СТ нужно интегрирование по его поверхности. выполнить Однако, если преломляющая поверхность колпака будет анаберрационной для осевой точки СТ, для его внеосевых точек влияние аберраций может оказаться большим, решения поэтому ДЛЯ точного задачи выравнивания светораспределения следует использовать не аналитические, а численные методы, которые мы здесь не затрагиваем. Особенностью СД является то, что спектральный состав его излучения отличается от спектра излучения ЛН, для которых в микроскопии разработаны методики окрашивания объектов, созданы атласы цветных изображений типичных объектов для

блица	KOB	Радиус R[мм]	9	9	9	9	9	9	8	3,692 ^x	3,692 ^x	3,692 ^x	3,692 ^x	
Ta	стры колпа	Bысота h[mm]	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	15,5	9,6	9,6	9,6	9,6	
	Парам	Диа- метр Ø[мм]	20	20	20	20	20	18	18	10	10	10	10	
		λ[HM]	1	455	525	590	630	-			460	526	630	
		Цвет свече- ния	Белый	Синий	Зеленый	Желтый	Красный	Белый	Белый	Белый	Синий	Зеленый	Красный	
	параметры	Размер кри- сталла [мм]				0,76x0,76	0,76x0,76	4,5	1,2x1,2	0,3x0,3	0,3x0,3	0,3x0,3	0,3x0,3	
	ахнические	Угол издуче- ния 2⊖₀₅ [град]	50	50	50	50	50	50	22	ø	4	4	4	
	Светот	J [кд]	120	12	120	59	110	55	40	35	3	10	10	
	кие ы	Ρ [Bτ]	5	5	5	3,5	4	5	1,3	0,11	0,11	0,11	0,11	
	ектричес араметр:	U [B]	7	7	7	13	13	7,5	4	4	4	4	2,5	
	н С	I [mA]	700	700	700	250	300	700	350	30	30	30	50	
		Тип СД	У-336 Бл	Y-336 C	У-336 И	У-336 Д	Y-336 E	Y-337 Eu	У 334 Бл	У-164 Бл	Y-164 C	У-164 И	Y-164 E	[\$

^х)- преломияющая поверхность зилиптическая

медицины и микробиологии, что может вызывать трудности при идентификации изображений объектов, освещаемых СД.

На рис. 10.3 приведены спектральные характеристики белых СД (а) и (б), цветных СД, суммарные спектральные характеристики излучения нескольких цветных СД (в), (г) и (д). Кривые (в), (г) и (д) отличаются друг от друга тем, что в (г), (д) участвует белый СД, что обеспечивает получение сплошного спектра. Так как цветных СД больше трех, то колориметрическая задача имеет множество решений, ЭТО дает возможность оптимизировать условия освещения (создание виртуального светофильтра). Укажем, что интенсивность пучков в СД для случаев (и), (г), (д) подобраны таким образом, что их координаты цветности x, y, z практически одинаковы – для (в) (x = 0,341, y = 0,339), для (г) (x = 0,341, y= 0,334) и для (д) (x = 0,319, y = 0,348) и близки координатам цветности источника типа **В**.



Рис. 10.3

Отметим, что в микроскопах медико-биологического назначения в основном используются источники типа A (лампы PH 8-20, КГМ 6-20, КГМ 9-70 и пр.), под которые и разработаны методы контрастирования изображения путем окрашивания объектов. На рис. 10.3 (е, ж) приведены спектры излучения источников типа A, B, C, отнормированные на максимум интенсивности и туда же наложены графики по рис. 10.3 (а), (б), (г), (д). Из рисунка видно, что кривые. хорошо вписываются в кривые источников типа B и C.

Освещение объекта белым светом может быть реализовано с использованием нескольких цветных светодиодов. Рассмотрим этот вопрос.

Допустим возможность аппроксимации спектра излучения цветного СД функцией Гаусса, что позволяет достаточно просто решать задачи по разработке ОУ с управляемым спектром. Тогда апроксимирующая функция имеет вид:

$$f(\lambda) \approx exp\left[\frac{-2(\lambda - \lambda_{max})^2}{\varpi^2}\right],$$
 (10.2)

где λ_{max} – максимум в спектре СД, ω – область существования спектра СД на уровне «*exp*(-2)», где ее значение колеблется от 20 нм до 55 нм. Сравним $f(\lambda)$ с классической кривой Гаусса [182]:

$$y(x) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right) \cdot exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)$$
, откуда ясно, что $\varpi = \sigma\sqrt{2}$.

Количество СД для получения равноэнергетического сплошного спектра в интервале 400÷700 нм можно определить через отношение **300**/ ω , что при $\omega \approx 30$ нм дает общее число СД, равное 10, а при $\omega = 55$ нм число СД будет равно 6, при этом на суммарной кривой (см рис 10.4 а, б) появятся провалы, глубину которых можно задать аналогично требованиям к провалам в суммарном светораспределении в изображении двух точек при определении разрешающей способности, например, по критериям Рэлея (глубина провала 26,5%) или Вадсворта (глубина провала 15%).

Имея такую спектральную характеристику ОУ, можно получить, например, такую же как у источников типа *A*, *B*, *C* или *D* в комбинации со светофильтрами или без них. Количество СД можно уменьшить, если ввести в состав цветных СД белый СД и ограничить количество СД числом 4 – красный (640 нм), зеленый (525 нм) или сине-зеленый, (505 нм), желтый (590 нм) и белый (см рис. 10.3 г, д). На рис. 10.4 (а) приведено суммарное светораспределение в ОУ с девятью СД, которое в диапазоне от 400 нм до 780 является равноэнергетическим и его координаты цветности x=y=z=0,333, а на рис. 10.4 (б) с шестью СД. Управление спектральной характеристикой осуществляется электрически (через прямой ток). Токовые зависимости координат цвета *X*, *Y*, *Z* линейны координаты

цветности *x*, *y* и *z* практически не меняются, так как их производная по току принимает постоянное значение, равное нулю.



Рис. 10.4

При разработке прибора, для которого верность цветопередачи является важнейшей характеристикой, такие ОУ с селективным спектром излучения будут весьма полезны. Сложность этой оценки связана как с селективными свойствами объекта, так и спектром освещающих пучков. Известно, что ухудшение цветопередачи может происходить за счет ярко выраженных монохроматических составляющих в спектре излучения источника света, к которым можно отнести источники с линейчатым спектром излучения (ртутные лампы типа ДРШ), а так же за счет ярко свойств объекта своей выраженных селективных В отношении отражательной, пропускающей И поглощающей способности. Если повлиять на свойства объекта невозможно, то повлиять на спектральную характеристику источника света реально, например, как в нашем случае: использования не трех, а более светодиодов с целью получения сплошного спектра. Важность наличия источника света с управляемой спектральной характеристикой определяется обратной еше И сложностью колориметрической задачи определения спектрального состава

65

излучения источника света в соответствии с требуемым качеством цветопередачи.

По координатам цветности первый СД близок к источникам типа С и *D*, а второй - к источникам типа A и B. Введение в матрицу наряду с СД белого свечения цветных СД делает эти характеристики управляемыми. На рис. 10.4 (в), (г) приведены примеры построения СТЗ микро-макроскопов. Следует отметить, что обе схемы (а) и (б) позволяют работать как с непрозрачными, так и с прозрачными объектами. В последнем случае под объектом необходимо расположить «белый» рассеиватель. На рис. 10.5 (а) приведено изображение миры, полученное подобным образом в системе, построенной по рис. 10.5 (ж) где использовался объектив «Минитар», а изображение фиксировалось твердотельной телекамерой VNC-743. Нами проведены исследования возможности использования СД в ОУ широкого класса микроскопов как технического применения – МИИ-4, ПСС-3 и ПМТ-3, ПОЛАМ Р-312, так и медико-биологического – МИКМЕД 1 и МИКМЕД 2 и пр. На рис. 10.5 (б) приведено изображение следа микропирамиды в материале, исследуемом на микротвердомере ПМТ-3М. Рассмотрен также вопрос по использованию ОУ со СД в микроскопах старых моделей Люмам Р-8, МБИ-15, в старых моделях Биолам С, микроскопах старых моделей Люмам Р-8, МБИ-15, в старых моделях Биолам С, Д, Р и пр., для которых разработаны и выпускаются светодиодные ОУ типа ОИ-32, ОИ-35 и ОИ-19. На рис. 10.5 (в, г) приизображения объект-микрометра при его ведены светлопольном освещении, полученные на микроскопе МБИ 15, выполненного по схеме рис.6.10 (в) с использованием СД белого свечения У-337.

На рис. 10.5 (д, е) приведены телевизионные изображения медицинских объектов – неокрашенных безъядерных форменных элементов крови, движущихся в переменном электрическом поле (кадр видеофильма) рис. 10.5 (д) и гистологический препарат рис. 10.5 (е).

Изображения получены на прямом тубусе микроскопа МБИ-4 с ОУ, выполненного по рис. 10.1 (в) с использованием СД У-337 и микрообъектива 40×0,65. На рис. 10.5 (ж) приведены результаты фотометрирования спектра люминесценции уранового стекла, вызываемой излучением от лампы КГМ 9-70 - кривая 1 и СД типа У-336 (λ = 455 нм, Р = 150 мВт) – кривая 2. Ординаты кривой 2 всего лишь в 1,9 раза меньше ординат кривой 1, что говорит в целом о перспективности использования СД для исследования спектров люминесценции, спектров поглощения, отражения и пропускания. Исследования выполнялись на установке, включающей микроскоп Люмам Р-8 с использованием спектрофотометрической насадки от МСФУ-К, в которой была использована дифракционная решетка с числом штрихов 600мм⁻¹, зонд размером 0,3 мм, раскрытие спектральной щели составляло 0,5 мм. В качестве фотоприемника использовался ФЭУ R928 (НАМАМАТЅU).



Рис. 10.5

На рис. 10.6 приведены примеры промышленной реализации светодиодных ОУ для бронированных машин (рис. 10.6 а, б, в, г). Устройство по рис.10.6 (г) содержит матрицу светодиодов. На рис. 10.7 приведена реализация светодиодного ОУ для микроскопа. На рис.10. 7 (а, б) показана монтировка ОУ в микроскопе, а на рис. 10.7 (в) приведен сборочный чертеж ОУ.





с выносным объективом:

1 – объектив формирования излучения,

- 2-ИК светодиод.
- в)



Внешний вид светодиодного осветителя со встроенным объективом 5883 P

г)

Групповой излучатель



Рис. 10.6

Рис. 10.7

11. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТОДИОДОВ В МЕДИЦИНСКИХ МИКРОСКОПАХ.

Появление на рынке новых типов источников света - лазеров (газовых, твердотельных, полупроводниковых), а также светодиодных источников света, которые относятся к полупроводниковым источникам и обладают выдающимися светотехническими и энергетическим характеристиками по яркости и коэффициенту светоотдачи, привели к ряду проблем их практического использования в классических задачах оптического приборостроения, микроскопии, в частности. Здесь нас в первую очередь будут интересовать светодиодные источники света.

Одной из проблем, связанной с продвижением микроскопов со светодиодным источником света в осветительном устройстве на рынок медицинской техники является отличие спектра излучения светодиода от спектра излучения лампы накаливания широко используемой в медицинских микроскопах. И, как следствие, изображение объекта при освещении светодиодом по цветовым характеристикам отличается от получаемого при освещении лампой накаливания. хорошо знакомого медикам по атласам микроизображений и из обыденной практики.

Рассмотрим, как точно передается цвет объекта в его изображении при использовании для его освещения различных источников белого света – ламп накаливания, светодиодов белого свечения, триады (КЗС) цветных светодиодов, группы из более трех цветных светодиодов и с помощью световых пучков чистых спектральных цветов (R-700 нм, G-546,1 нм, B-435,8 нм.), например, от трех гипотетических цветных лазерных источников.



В лампах накаливания выделим три типа источника – А, В и С, первый из которых это лампа накаливания с цветовой температурой 2896 К°, а два других получаются при использовании с той же лампой для источника типа В (цветовая температура 4800К°) светофильтров C3C-17(5,1), ПС-5(5,85) и ПС-14(4,8) и для источника типа С (цветовая температура

6500К°) светофильтров C3C-17(6,95), ПС-5(7,4) и ПС-14(6,6). В скобках указана толщина фильтров в миллиметрах. Светодиоды белого свечения также подразделяются по цветовой температуре на холодные и теплые. На рис. 11.1, 11.2, 11.3 представлены спектры излучения перечисленных источников света.



Рис. 11.3

В качестве объекта возьмем три его точки, в которых объект имеет различное спектральное пропускание (отражение), представленное на рис. 11.4.



Рис. 11.4

Каждый спектр определяет цвет точки, например, точка с равномерным спектром обладает идеальным белым цветом. В Таблице 1 представлены координаты цветности (*x*, *y*. *z*) всех объектов, источников света и изображений, получаемых при освещении объекта тем или иным источником. Сразу отметим, что координаты цветности равнояркостного источника света и изображения объекта при освещении объекта этим источником равны. Координаты цветности изображения *xs*, *ys*, *zs* рассчитывались по формулам:

$$xs = \frac{X}{X+Y+Z}$$
 $ys = \frac{Y}{X+Y+Z}$ $zs = \frac{Z}{X+Y+Z}$

где *X*, *Y* и *Z* координаты цвета, для расчета которых применялись формулы:

$$X = \int_{380}^{780} F6(x) \cdot f_1(x) \cdot W(x) dx \quad Y = \int_{380}^{780} F6(x) \cdot f_2(x) \cdot W(x) dx$$

$$Z = \int_{380}^{780} F6(x) \cdot f_3(x) \cdot W(x) dx$$

где F(x), W(x) спектральные характеристики объекта и источника, $f_1(x)$, $f_2(x)$ и $f_3(x)$ удельные координаты цвета.

Для чистых спектральных цветов интегрирование заменялось суммированием.

Из данных Таблицы 1 видим, что для наиболее употребляемого источника типа А не обеспечивается правильная цветопередача в изображении для всех рассматриваемых объектов, а что касается источников типа В и С, то они нарушают цветопередачу существенно меньше, но набор светофильтров, с которым должна работать лампа имеет коэффициент пропускания для источника типа В равный 14% и для источника типа С 8%. Из светодиодов белого свечения по цветопередаче холодный предпочтительнее теплого. Для источника из трех чистых спектральных цветов при верной цветопередаче объекта белого цвета происходит нарушение для двух других рассматриваемых объектов. Наиболее сбалансировано для всех объектов правильную цветопередачу обеспечивает группа из шести цветных светодиодов. Относительно триады КЗС из цветных светодиодов следует сказать, что они не обеспечивают сплошного спектра для суммарного освещающего пучка, отчего не могут быть использованы для задачи спектрофотометрирования, но при четвертым светодиодом белого свечения дополнении триады ЭТО ограничение снимается. В целом по данным Таблицы 1 в отношении правильности цветопередачи предпочтение следует отдать светодиодам.

Важным достоинством многосветодиодного источника является его практически безинерционная управляемость через прямой ток, что дает возможность имитировать спектр практически любого источника света в том числе при работе этого источника в комбинации с любым светофильтром.

На рис. 11.5 приведены спектры изображения объекта при освещении последнего холодным светодиодом белого свечения (а) и источником типа *А* (б), где ясно просматривается влияние спектрального состава освещающих пучков

На рис. 11.6 приведены цветные изображения объектов полученные с использованием светодиодов холодного (б) и теплого (а) белого свечения и лампы накаливания PH-8-20 (тип A) (в). Визуальная оценка показывает, что светодиод холодного белого свечения обеспечивает изображение более близкое по цветовому ощущению к изображению, полученному при освещении лампой, чем светодиод теплого холодного свечения.







bioT20x



Сказанное относится к объекту, наблюдаемому невооруженным глазом, а не к его изображению, получаемому с помощью оптической системы, например, микроскопа. В качестве объекта нами рассматривалась точка, не имеющая конечных размеров, тогда как ее изображение за счет дифракции будет иметь конечные размеры различные для различных длин волн. Светораспределение в изображении точки для безаберрационной системы E(r) вычисляется по формуле

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \coloneqq \left(\frac{\pi \mathbf{D}}{\lambda}\right)^2 \cdot \left(2 \cdot \frac{\mathbf{H}\left(\mathbf{k} \mathbf{D} \cdot \frac{\mathbf{r}}{2 \cdot \mathbf{z}}\right)}{\mathbf{k} \cdot \frac{\mathbf{r} \mathbf{D}}{2 \cdot \mathbf{z}}}\right)$$

J1(r) – функция Бесселя первого рода первого порядка, r – где координата (полярная) в плоскости изображения, \mathbf{k} – волновое число, λ – длина волны, **D** – диаметр зрачка оптической системы, z – задний отрезок, выполняющий роль масштабного множителя.

Допустим, что объект белая точка с равнояркостным спектром пропускания (поглощения), которая освещается триадой из чистых спектральных цветов RGB. Тогда светораспределение в изображении точки определится суммой трех функций, вычисленных по последней между формуле. Соотношение спектральными составляющими освещающих пучков необходимое для получения белого цвета, очевидно,

72

будет нарушаться, и мы будем иметь различные координаты цветности в разных точках изображения. Вычислим координаты цвета **X**, **Y**, **Z**, которые уже будут зависеть от r по формулам:

$$X(r) := El(r) \cdot fl(435) + E2(r) \cdot fl(546) + E2(r) \cdot fl(700)$$

$$Y(r) := El(r) \cdot f2(435) + E2(r) \cdot f2(546) + E2(r) \cdot f2(700)$$

$$Z(r) := El(r) \cdot f2(435) + E2(r) \cdot f2(546) + E2(r) \cdot f2(700)$$

где f1(435), f2(546), f3(700) – удельные координаты цвета.

$$\mathbf{xs}(\mathbf{r}) \coloneqq \frac{\mathbf{X}(\mathbf{r})}{\mathbf{X}(\mathbf{r}) + \mathbf{Y}(\mathbf{r}) + \mathbf{Z}(\mathbf{r})} \qquad \mathbf{ys}(\mathbf{r}) \coloneqq \frac{\mathbf{Y}(\mathbf{r})}{\mathbf{X}(\mathbf{r}) + \mathbf{Y}(\mathbf{r}) + \mathbf{Z}(\mathbf{r})} \qquad \mathbf{zs}(\mathbf{r}) \coloneqq \frac{\mathbf{Z}(\mathbf{r})}{\mathbf{X}(\mathbf{r}) + \mathbf{Y}(\mathbf{r}) + \mathbf{Z}(\mathbf{r})}$$

Для координат цветности, которые также будут функциями от r, имеем индекс «s» указывает на то, что мы имеем дело с суммарными характеристиками. На рис. 7(а) показаны графики изменения X(r), Y(r), Z(r), а на рис. 11.7 (б) графики для xs(r), ys(r), zs(r).



Белый цвет в изображении сохраняется только для осевой точки. Таким образом, оптическая система С исправленными аберрациями не гарантирует правильной цветопередачи в изображениях элементов структуры объекта - точках, линиях, границах. Это явление будет устранено, если в каждой точке дифракционного изображения будет соблюдаться для спектральных составляющих условия для получения белого цвета, т.е. дифракционные картины не должны отличаться друг от друга масштабом вдоль оси абсцисс, что может иметь место при разных апертурах ДЛЯ спектральных составляющих освещающего пучка, селективной аподизации. например, за счет Таковая может быть осуществлена путем простого диафрагмирования пучков рассматриваемых цветов (RGB) или же при различном удалении цветных светодиодов от апертурной диафрагмы конденсора в плоскости которого установлен смеситель, например, рассеиватель из молочного стекла, при этом

73

координаты цветности сохранят свои значения во всей области существования изображения (см. рис. 11.8).





На рис. 11.9 приведены коэффициенты пропускания мышечной ткани толщиной 1мм – My(x) и 4 мм – My1(x) отражения My2(x). Видим, что координаты цветности зависят не только от выбора типа источника света при работе на пропускание, но и от толщины объекта, что определяется логарифмической зависимостью между коэффициентами пропускания и поглощения.



При освещении чистыми спектральными цветами или пучками квазимонохроматическими, например, пучками цветных светодиодов соотношение между *RGB* пучками при регистрации телевизионного изображения вероятно будет иным, чем при визуальной регистрации, например, при необходимости формирования равносигнального белого цвета, когда при белом объекте сигналы *R. G и B* будут одинаковыми. Отметим, что площади под кривыми чувствительности пикселов *RGB* практически одинаковы.

В Табл.3 приведены значения сигналов с матрицы цветной телекамеры RGB при прежних объектах и источниках света.

В качестве выводов можем констатировать, что только равноэнергетический источник света обеспечивает правильную цветопередачу в изображении для визуального и телевизионного каналов. Во всех остальных случаях необходимы меры по цветокоррекции (баланс белого). Ниже приведены примеры имитации спектрального состава



Рис. 11.10

различных источников света с помощью семисветодиодного осветительного устройства.

На рис.11.10 (а) приведена спектральная характеристика излучения семисветодиодного осветительного устройства, которая может быть изменена через управление прямым током, что позволяет реализовать спектры излучения как ламп накаливания (источники типа *A*, *B* и *C*, см. рис.11.10 (б, в), так и излучения белых светодиодов (теплого, см. рис 11.10 к).

Ниже под рисунками приведены значения координат цветности x, y, z. Табл.2 построена аналогично Табл.1.

Обратим внимание на рис.11.10 (а) и значения координат цветности – мы здесь имеем эквивалент равнояркостного источника света типа Е (идеальный белый цвет). Отметим, что координаты цветности источников типа A, B и C (см. рис. 11.1 б, в) и их семисветодиодной модели совпадают по значению с точностью до третьего знака после запятой. Легко понять, что имея такого рода источник света, становится возможным компенсировать селективные свойства телеканала, например, микроскопа и получить факсимильное изображение цветного объекта.

блица 1			z 0,286	0,090	0,252	0,323	0,305	0,150	0,268	0,274	0,268	
Ta		x/1000	y 0,356	0,550	0,372	0,342	0,335	0,337	0,357	0,354	0,364	
			x 0,361	0,360	0,376	0,336	0,360	0,453	0,374	0,371	0,376	
	-		z 0,563	0,333	0,533	0,597	0,628	0,424	0,423	0,439	0,554	
	0 6 5 e K 1	1+Sin(0,03x)	y 0,203	0,292	0,221	0,191	0,155	0,241	0,191	0,196	0,210	
			x 0,234	0,375	0,246	0,212	0,217	0,334	0,387	0,365	0,236	
			z 1/3	0,145	0,296	0,371	0,351	0,180	0,330	0,331	0,312	
		1	у 1/3	0,408	0,355	0,320	0,315	0,390	0,335	0,333	0,347	
			x 1/3	0,448	0,349	0,310	0,335	0,430	0,335	0,335	0,341	
			Источник	A	В	0	CDX	CDT	RGB-cnearp	RG B 3 ibetheix CD	б цветных CD	

Координаты цветности х, у, z источника света совпадает с координатами цветности объекта «1», равнояркостного в спектральном интервале 380 – 700 HM.

CD X - холодный светодиод, CD T - теплый светодиод.

76

\sim
ца Ц
Ы
5
્યું
Ч

My(x)	My(x)				Объек; Myl(x)			My2(x)	
-)	X	N N	2	N C	λ. Δ	200	N (y Sere	Z
	0,456	0,379	0,164	0,503	0,3	0,197	0,371	0,352	0,277
	0,548	0,386	0,066	0,605	0,33	0,065	0,488	0,397	0,115
	0,467	0,386	0,147	0,518	0,31	0,172	0,386	0,368	0,246
	0,429	0,378	0,193	0,471	0,291	0,238	0.343	0,343	0,314
	0,447	0,353	0,2	0,477	0,286	0,237	0,367	0,326	0,307
	0,531	0,372	0,098	0,584	0,321	0,095	0,47	0,379	0,151
	0,575	0,370	0,055	0,646	0,250	0,104	0,479	0,323	0,198
	0,522	0,378	0,1	0,607	0,258	0.135	0,45	0,333	0,217
	0,460	0,382	0,159	0,509	0,303	0.188	0,377	0,359	0,264
					1 2 2 2 2			2 T	с врико
-									
_		(X MINI			IVIY I(2	0		INIY2(X)	
	24	υ	д	Ч	ť	д	<u>بر</u>	U	д
	0,552	0,273	0,175	0,696	0,176	0,129	0,445	0,304	0,251
	0,705	0,22	0,075	0,812	0,151	0,037	0,639	0,255	0,106
	0,562	0,275	0,163	0,712	0,176	0,112	0,463	0,307	0,23
	0,494	0,295	0,212	0,647	0,188	0,165	0.386	0,320	0,294
	0,528	0,273	0,199	0,647	0,180	0,172	0,412	0,308	0,280
	0,678	0,224	0,097	0,794	0,148	0,059	0,601	0,265	0,134
	0,840	0,158	$1.99*10^{3}$	0,846	0,152	1.859*10	3 0,834	0,16	$6.6^{*}10^{3}$
	0 704	0.203	3 065-10-3	0 810	0.183	-1 644-10	3 0.775	70C U	0.018
		0.400	01 20062	11000	1010			0,400	0100
	0,556	0.273	0,171	0,706	0,176	0.119	0,457	0.306	0.237

12. КИНО-ФОТО-ТЕЛЕКАНАЛЫ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА.

Введение в состав **ОП** помимо визуального канала, который в ряде случаев может отсутствовать, кино-фото-телеканалов связано с рядом причин, а именно:

- с необходимостью документирования результатов наблюдений с целью их архивации, обеспечения объективности оценки;

- с созданием возможности последующей или в режиме реального времени обработки результатов наблюдения;

- с созданием комфортных условий наблюдения (астрономия, исследования в труднодоступных или опасных местах);

- с целью автоматизации, желательно полной, наблюдений и обработки результатов наблюдений.

ОП может содержать сразу несколько каналов наблюдения и здесь возникает задача адекватности восприятия информации в каждом из этих каналов.

Укрупнение ОП с каналами наблюдения можно представить в виде



Рис. 12.1

схемы:

О, **И** – объект и его изображение, **ОП** – оптический прибор, **Д** – детектор (глаз, фотоприемник видикон, ПЗС-матрица, ФЭУ, ФД и пр.), **К** – канал передачи, **СОИ** – система отображения информации.

Цепочку **О-ОП-И** мы уже изучили. Д – рассматривается в специальных курсах и мы на этом подробно останавливаться не будем. **К** – в канале, который мы также рассматривать не будем, может происходить не только передача сигнала, но и его обработка. **СОИ** – будем рассматривать ниже.

Задача разработчика увязать свойства и характеристики отдельных элементов схемы с целью ее оптимизации.

Для Д важным является, чтобы сигнал с него верно описывал светораспределение на объекте. Как и у всех приемников, свойства кинофотоприемников, с которых мы начнем, определяются чувствительностью $S(\lambda)$ и динамическим диапазоном, в данном случае - фотографической широтой. Если проявить неэкспонированную пленку, то ее почернение можно определить через коэффициент пропускания $\tau_{0,2}$ или оптическую плотность $D_{0,2}$

$$D = -\ell g \tau \tag{12.1}$$

Уровень $D_{0,2}$ определяет фотографическую вуаль. Значению $D_{0,2}$ соответствует некоторая экспозиция $H_{0,2}=H_{D0-0,2}$, а величина обратная $H_{0,2}$ определяет светочувствительность пленки

$$S_{0,2} = \frac{1}{H_{0,2}} \tag{12.2}$$

Экспозиция же H определится так: $H=E \cdot t$, где t время экспонирования. Динамический диапазон определится характеристической кривой (рис.12.2).

Считается, что на участке АВ пленка проявляет свойства, близкие к



линейным.Величина $L = lg\left(\frac{H_B}{H_A}\right)$ определяет фотографическую широту линейного участка *AB*, где имеет место

светораспределение, верно отражающее свойства объекта. От широты *L* можно перейти к интенсивности (яркости)

$$BB_B = B_{0,2} \cdot 10^L L \approx 1,5 \div 2 B_B = B_A \cdot 10^L$$
(12.3)

Производная **D** по **lg H** определяет угол наклона отрезка *AB*

$$\gamma = \frac{dD}{d(lg H)} \tag{12.4}$$

 $\gamma \approx 0,7 \div 1,8$

Величина γ называется коэффициентом контрастности. При $\gamma=1$ имеется факсимильность – изменение прозрачности негатива равно изменению освещенности на изображении. Этого результата трудно добиться, а если учесть процесс фотопечати на фотобумагу, то задача становится весьма трудной, и без введения специальных приемов коррекции не обойтись.

Если изображение регистрируется ФЭУ, фотодиодом (ФД) и пр., то регистрация изображения двухмерного объекта возможна при осуществлении сканирования по поверхности объекта (изображения). Здесь также важной характеристикой является чувствительность, динамический диапазон, отношение сигнал/шум **ψ**:

$$\psi = 20 lg \left(\frac{E}{E_{min}}\right) \tag{12.5}$$

Здесь просматривается связь с L – фотографической широтой. Для чувствительности $S(\lambda)$ имеем:

$$S(\lambda) \approx \frac{i_{min}}{\Phi_{min}}$$
 (12.6)

под i_{min} можно понимать темновой ток. Детектор типа ПЗС отличается от $ФЭУ \PhiД$ и пр. тем, что в них осуществляется электронная развертка,

которая не исключает режима супер-развертки, когда имеется две развертки – электронная и, например, механическая. Такая суперразвертка имеет место в сканерах с линейным ПЗС (ЛПЗС), варианты реализации которой приведены на рис. 12.3



Рис. 12.3

На рис. 12.3 (а) рассмотрена общая принципиальная схема сканера. ИC, включающая источник света который обычно линейный (ЛЛ) либо линейка люминесцентная светодиодов (СД). В лампа случае объект прозрачный И ОН перемещается рассматриваемом относительно ИС на всю свою длину. Зеркало отбрасывает прошедшее излучение на объектив, который строит изображение объекта в плоскости ЛПЗС. На рис. 12.3 (б), и 12.3 (в) приведены случаи построения сканера для не прозрачного объекта, где выделены два варианта для диффузно отражающего объекта и зеркально отражающего. Принцип работы понятен из рисунков, но следует отметить, что у диффузно отражающего объекта могут быть участки, отражающие свет зеркально и они будут в получаемом изображении затемнены, что аналогично будет иметь место и для второго типа объекта.

В ряде случаев при зеркально отражающем объекте линейный ИС должен быть искривлен по дуге окружности с центром в осевой точке входного зрачка объектива, как это показано на рис. 12. 4, где в роли линейного ИС использована искривленная по дуге окружности линейка СД.



Рис. 12.4

В верхней части сканера не верно выбран шаг следования СД. В изображении в плоскости ЛПЗС получаются провалы в освещенности.

Внизу шаг следования СД выбран верно. Провалов нет, которые в данном случае не допустимы, т.к. изображение представляет из себя одиночный

импульс некоторой ширины.

Для выравнивания светораспределения необходимо либо подбирать ИС с одинаковыми светотехническими характеристиками, либо вводить электронную коррекцию на каждый СД, что накладно или же работать в режиме насыщения, но в этом случае вместо приемника типа ПЗС рекомендуется использовать приемник типа КМОП. По приведенной схеме построена система технического зрения (СТЗ) латчика износа контактного провода на железнодорожном вагоне-лаборатории контроля параметров контактной сети, где установлены 4 таких датчика. Из-за зигзага, с которым прокладывается контактный провод, поле зрения датчика износа составляет 1000 мм и, т.к. габаритные ограничения не позволяют отнести объектив подальше от объекта, поле зрения разбивается на четыре по 250 мм каждое, что и приводит к необходимости иметь четыре одинаковых датчика. Задача их компоновки непростая, так как четыре поля должны быть состыкованы механическим и электронным способом.

На рис. 12.5 приведена компоновка датчиков в плане. По дугам аб, вг, де и жз расположены светодиоды, в плоскости изображения. И помещен

линейный фотоприемник. Сканирование осуществляется за счет движения вагона.



Рис. 12.5

Ответим на вопросы по требованиям к объективу такого датчика. Его линейное увеличение **β** определится по формуле:

$$\beta = \frac{4l}{L}, \qquad (12.7)$$

где L – размер всей зоны объекта, l - длина чувствительной зоны ЛПЗС, которую примем известной, как и число элементов в ней откуда получаем шаг ЛПЗС Δx :

$$\Delta x = \frac{l}{N}.$$
(12.8)

Апертура объектива определится из требований к минимальной освещенности изображения E_{min} (паспортная характеристика приемника) и, например, требуемому отношению сигнал/шум Ψ

$$E = E_{min} \cdot 10^{\frac{\Psi}{20}}.$$
 (12.9)

Зная значение *E*, по известным формулам определим относительное отверстие объектива.

Оценим теперь необходимую степень коррекции аберраций объектива, учитывая как необходимую точность измерения, так и то, что получаемое аналоговое изображение в датчике подвергается компьютерной обработке – компарированию, т.е. реальный импульс заменяется на прямоугольный.

Если принять идеальное изображение объекты и импульсные реакции всех основных элементов датчика в виде прямоугольного импульса, то результирующее реальное изображение E(x) определится двойной сверткой:

$$E(x) \approx g_0(x) \otimes h_g(x) \otimes h(x), \qquad (12.10)$$

где $E(x)=rect(x/X_0)$ - светораспределение в идеальном изображении, X_0 ширина идеального изображения, $h(x)=rect(x/2\delta g')$ – функция рассеяния объектива, δg – радиус аберрационного кружка объектива, $h_g(x)=rect(x/\Delta x)$ – импульсная реакция линейного ПЗС.

С достаточной для практики точностью можно утверждать, что на половине высоты реального изображения (рис. 12.6) его ширина равна ширине идеального изображения, поэтому при проведении компарирования по этому уровню можно исключить действие всех уширяющих факторов – аберраций объектива и усреднения по элементу ЛПЗС.



Рис. 12.6

1 – светораспределение в идеальном изображении, 2 – светораспределение в реальном изображении. Это важный результат и он позволяет выполнять точные измерения даже при наличии больших аберраций у объектива.

13. ТЕЛЕВИЗИОННЫЕЫЕ СИСТЕМЫ С МАТРИЦАМИ ПЗС.

Рассмотрим вопросы построения оптической системы прибора, когда объект является сложноструктурированным, а фотоприемником является матрица ПЗС телекамеры (ТК). Представим оптическую систему одним компонентом Φ , являющимся эквивалентной системой, что позволит обобщить результаты на оптические приборы разного класса.. На рис. 13.1 представлена такая система, где объект О освещается волной W, условно представляющей все освещающие пучки.

Нас опять будут интересовать вопросы выбора режима работы Φ в зависимости от требований к точности измерений и свойств фотоприемника (формата $N \times M$). Пусть задан размер объекта 2y. Если известен формат ПЗС ($a \times b$), то линейное увеличение β определиться однозначно, например, через диагональ матрицы.

$$\beta = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2y}} \tag{13.1}$$



Из характеристики по чувствительности ПЗС $S(\lambda)$ определяем минимальную освещенность E_{min} (часто приводится минимальный световой поток Φ_{min} или минимальное значение освещенности E_{min})

$$Φmin = iminS(λ) откуда Emin = \frac{Φmin}{[a \times b]},$$
(13.2)

где $\Delta x(\Delta y) = \frac{a}{N} \left(\frac{b}{M}\right)$ - размер пиксела.

Обычно также задается отношение сигнал/шум.

$$\Psi = 20 \log\left(\frac{E}{E_{min}}\right) \tag{13.3}$$

Пусть **ψ**=40 дб тогда *E*=100*E*_{*min*}

$$Sin\sigma' = \sqrt{\frac{E}{\tau \pi B}}$$
(13.4)

 τ – коэффициент пропускания системы, которым на первой стадии можно задаться, **B** – яркость объекта, определяется или свойствами самосветящегося объекта или через ОУ, в состав которого входит источник света яркость, которого и определит значение **B**. Зная **Sin**σ' и β находим **Sin**σ

$$Sin\sigma = \beta Sin\sigma'$$
 (13.5)

Ранее мы говорили, что апертуры оптической системы связаны с требованиями по разрешающей способности N_0 и с требованиями по контрасту изображения на какой-то пространственной частоте N.

 $N_0 = \frac{2A}{\lambda} = \frac{2Sin\sigma}{\lambda}$, где λ длина волны, за которую принято брать

среднюю в спектральном интервале, в котором работает прибор, что как мы увидим ниже не целесообразно

Контраст изображения на частоте *N* может быть определен по формуле:

$$T(N) = 1 - \frac{|N|}{N_0}$$
 (13.6)

Откуда мы также определим N_{θ}







$$N_0 = \frac{|N|}{1 - T(N)}$$
(13.7)

и при этом N_0 находим новое значение апертуры $Sin\sigma = \frac{N_0\lambda}{2}$.

Из найденных значений величин выбираем те, которые удовлетворяют всем перечисленным требованиям.

Так как на ПЗС матрице происходит дискретизация изображения, то проверяем условия соблюдения критерия Найквиста по двум направлениям, т.к. шаги матрицы могут быть разными по строке и столбцу. Значение N_0 следует вычислять не по средней λ рабочего спектрального интервала, а по наименьшей длине волны. Если это условие не соблюдается, то необходимо либо заменить матрицу ПЗС, либо согласиться с появлением ложных структур в изображении, либо, что чаще всего и делают высокие частоты в изображении предварительно отфильтровывают, уменьшая значение апертур. Наиболее известное проявление ложной структуры – муар, который при фотометрировании периодичной структуры проявляется в виде биений (см. рис.13.2).

а – изображения объект-микрометра с ценой деления 0,005 мм и его осциллограмма при размере телевизионного растра 768×576, б - изображения объект-микрометра и его осциллограмма при размере телевизионного растра 768×240, в - изображения объект-микрометра его осциллограмма при размере телевизионного растра 320×240.

С математической точки зрения под биениями понимается результат сложения двух гармонических колебаний с близкими периодами

$$Cos\alpha + Cos\beta = 2Cos\left(\frac{(\alpha + \beta)}{2}\right) \cdot Cos\left(\frac{(\alpha - \beta)}{2}\right)$$
(13.8)
$$\frac{\alpha}{\beta} \approx 1 \quad \alpha = \left(\frac{2\pi}{T_1}\right) x \quad \beta = \left(\frac{2\pi}{T_2}\right) x$$

$$\overline{T}_1 = \frac{T_1 T_2}{2(T_1 + T_2)} \quad \overline{T}_2 = \frac{T_1 T_2}{2(T_2 - T_1)}$$
(13.9)

Если соблюдаются условия линейности, то ОС и ТК описываются своими передаточными функциями $\Pi \Phi$ -*T*(*N*) и *V*(*N*), где

$$V(N') = \frac{Sin(\pi m)}{\pi m}, \qquad (13.10)$$

где $m=\delta N'$, $\delta - (\Delta x \, или \, \Delta y) - размер пиксел ПЗС. При <math>m=0,5$ имеем случай соответствующий частоте Найквиста $N'=1/2\delta$, при которой

$$V(N') = \frac{Sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{\pi}{2}} \approx 0,637$$
(13.11)

Общая ПФ звена $\Theta(N') = T(N')V(N')$. Мы ранее видели, что значение N_0 зависит от λ , следовательно, для разных λ будет разное значение $N_0(\lambda)$ и в цветном изображении «частотное» содержание будет неодинаково, поэтому будет нарушаться цветопередача на средних и высоких частотах. И эти нарушения будут определяться не const, а некоторой var функцией.





Сложности с телевизионным сигналом будут проявляться и в том, что V(N') имеет отрицательные значения (рис.13.4).



Мы пока не говорили о цветных ТК, а только о черно-белых ТК, если же принять во внимание, что ТК цветная (*RGB* или *RGGB*), то вопрос о факсимильности получаемого изображения еще больше усложнится.

Оказать влияние на появление искажений в изображении может и характер освещения объекта, например, при когерентном освещении ОС линейна относительно амплитуды светового поля, а известные детекторы регистрируют интенсивностью.

Рассмотрим случай работы оптической системы в частотном пространстве при нормальном КО объекта с амплитудным пропусканием последнего t(x), где $t(x)=1+Cos(2\pi f_0 x)$, где f_0 – пространственная частота синусоидальной решетки. При нормальном освещении объекта пучком

87

параллельных лучей в образовании его изображения участвуют все три дифракционных порядка. С учетом аберраций оптической системы для функции распределения поля амплитуд в изображении *t*(*x*') имеем:

$$t(x') = 1 + exp[j\Phi_0]Cos\left\{2\pi\left(\frac{x'}{\beta}\right)f_0 - \varphi\right\},$$
(13.12)

где **β** – линейное увеличение системы, *z* – расстояние от объекта до входного зрачка системы.

 $\Phi_0 = 0.5k[\Phi(z\lambda f_0) + \Phi(-z\lambda f_0)], \quad \varphi = 0.5k[\Phi(z\lambda f_0) - \Phi(-z\lambda f_0)],$ (13.13)где $\Phi(z\lambda f_0)$ – волновая аберрация оптической системы. С учетом того, что $exp[j\Phi_0] = Cos\Phi_0 + jSin\Phi_0$ делается вывод, что величина $Cos\Phi_0$ определяет аналог ПФ - ЧКХ при КО. Действительно, модулировать сигнал по амплитуде может лишь действительная часть комплексной функции. Из *t*(*x*') видно, функция выражения для что эта также описывает косинусоидальное распределение поля амплитуд, что говорит 0 линейности системы при КО относительно амплитуды. Распределение освещенности E(x') в изображении определится по формуле: E(x') = $t(x')t^*(x')$, где t(x') и $t^*(x')$ – комплексно-сопряженные функции

$$E(x') = \left\{ 1 + exp[j\Phi_0] Cos\left(2\pi\left(\frac{x'}{\beta}\right)f_0 - \varphi\right) \right\} \cdot \left\{ 1 + exp[-j\Phi_0] Cos\left(2\pi\left(\frac{x'}{\beta}\right) - \varphi\right) \right\} = 1,5 + 2Cos\Phi_0 Cos\left(2\pi\left(\frac{x'}{\beta}\right)f_0 - \varphi\right) + 0,5Cos\left(4\pi\left(\frac{x'}{\beta}\right)f_0 - 2\varphi\right).$$
(13.14)

В выражении для распределения освещенности в изображении появилась вторая гармоника $Cos\left(4\pi\left(\frac{x'}{\beta}\right)f_0-2\varphi\right)$, что нарушает косинусоидальное

светораспределение, в чем и проявляются нелинейные свойства системы по отношению к освещенности. На рис. 13.5 приведен



Рис. 13.5

график E(x') – кривая 3 и кривые 1, 2, определяющие изменения второго и третьего слагаемых в () при $\Phi_0 = 0$ и $\varphi = 0$, то есть при отсутствии аберраций, что говорит о других причинах, определяющих нелинейность системы при КО. Величина $Cos\Phi_0$ приводит к снижению контраста, а φ к
смещению. Отметим, что повышение контраста изображения при КО в два раза следует из наличия коэффициента **«2»** у второго слагаемого. Отметим без приведения доказательств, что вторая гармоника исчезает при косом освещении.

Третий тип освещения – ЧКО, занимает промежуточное положение между НО и КО, в большей степени соответствует режиму работы оптической системы телеканала микроскопа. Для объекта с амплитудным пропусканием, аналогичным предыдущему случаю, E'(x') в изображении определится по формуле:

$$E'(x') = A + B \cdot Cos\left(2\pi \frac{x'}{\beta}f_0\right) + C \cdot Cos\left(4\pi \frac{x'}{\beta}f_0\right), \qquad (13.15)$$

где коэффициенты *A*, *B* и *C* зависят от спектров Фурье функции взаимной интенсивности объекта и амплитудной функции рассеяния оптической системы.

14. ОСНОВЫ РАБОТЫ С ИЗОБРАЖЕНИЕМ.

Из предыдущего материала ясно, что при работе с изображением, полученным с телекамеры и отображенном на экране монитора, его дискретизация осуществляется не менее двух раз. Первый раз на телекамере через телевизионную развертку и второй раз на экране монитора с последующей фильтрацией на зрачке глаза наблюдателя. Это приводит к снижению качества наблюдаемого с экрана изображения по сравнению с изображением, получаемым в визуальном канале оптического прибора и как следствие к необходимости предобработки изображения с целью улучшения его качества до уровня необходимого для успешного решения задачи прибора – регистрация, измерения и пр. Предобработка может выполняться автоматически по заложенному в прибор ПО, полуавтоматически или вручную – режим диалога. Методы цифровой изображения обработки довольно развиты сильно И ΜЫ здесь познакомимся с основными.

Изображение обычно получается на каком-то фоне, на него так же накладываются шумы телекамеры, дисплея и других компонент в том числе загрязненной оптики. Один из простых приемов уменьшения шумов является использование режима накопления по кадрам или пикселам. Например, если изображение формируется как усредненное из N кадров, то уровень шумов уменьшится в \sqrt{N} раз. Однако это не применимо для регистрации динамических процессов и не эффективно в борьбе с Здесь загрязнением оптики фоном. становится необходима И предобработка изображения, например, его фильтрация, контрастирование, гамма-коррекция осуществляется пр., что И электронным способом. Начнем с методов фильтрации, которые основаны на операции свертки изображения с ядром w(i,j), имеющим обычно формат 3х3 или 5х5. Иногда это называют обработкой скользящим окном.

89

$$I'(x,y) = \sum_{i} \sum_{j} I(x+i,j+j)w(i,j) + C$$
(14.1)

$$w = \begin{pmatrix} w(1,1) & w(1,2) & w(1,3) \\ w(2,1) & w(2,2) & w(2,3) \\ w(3,1) & w(3,2) & w(3,) \end{pmatrix}$$
(14.2)

C – константа, **w(i,j)** – элементы (коэффициенты) матрицы, сумма которых равна 0 или 1 в зависимости от вида фильтра.

Например, для сюжета по рис.14.1 сумма коэффииентов равна нулю для **w(i,j)** имеем вид



Рис.14.1

Эта операция относится к спецэффектам и называется тиснение, рельеф или подсвечивание.

Для подавления шумов на изображении ядро свертки может иметь следующий вид:

$$w = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$
(14.3)

а сумма коэффициентов равна 1, поэтому введен множитель 1/9. На рис.14.2 приведен пример действия такого фильтра



Для фильтра подчеркивания границ имеем:

$$w = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$
(14.4)

На ри.14.3 приведен пример действия такого фильтра



Рис.14.3

До и после фильтрации может потребоваться контрастирование и изменения яркости изображения E(x,y), что математически можно представить в виде уравнения

$$E(x,y) = E(x,y)^*K + C,$$
 (13.5)

где К и С константы.



Рис.14.4

Фильтров таких много, поэтому остановимся на рассмотренных, Но упомянем о медианном фильтре, при котором центральный отсчет заменяется медианой всех отсчетов, попавших в скользящее окно (ядро свертки **w**(**i**,**j**)), для которого часто принимают:

$$w = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$
(14.6)

Многие задачи при работе с изображением требуют его упрощения без потери необходимой информации. Например, часто встает необходимость перехода от полутонового к бинарному, т.е. имеющего две градации "черное" и "белое", или же может появиться необходимость уменьшения числа градаций (уровней серого), например, с 256 до 64 и т.п. На рис.14.5 приведен пример бинаризации изображения.



Рис.14.5

Эта операция иногда называется - пороговая обработка изображения. Здесь важно отметить, что по-прежнему в основе работы со скользящим окном лежит операция свертки – интеграл суперпозиции. Следует отметить аналогию между методами контрастирования в оптике наблюдение темнопольном косом освещении при И объекта, дифференциальный интерференционный контраст, фазовый контраст Цернике и пр. и методами фильтрации. Последнее позволяет в ряде случаев, получив изображение, например, с помощью рабочей модели микроскопа, в итоге получить результат на уровне, полученного с помощью исследовательской модели микроскопа.





Рис. 14.6

На рис. 14.6 приведено телевизионное изображение, полученное на микроскопе с последующей обработкой по методу тиснение (подсветка), где просматривается азимутальный эффект, свойственный оптическим изображениям при косом освещении объекта.

Развитые математические приемы реставрации, улучшения качества цифрового изображения позволяют перенести ряд опций по коррекции аберраций оптического изображения с оптической системы на электронные блоки, а так же появляется возможность использования более широких допусков.

Не менее важным является возможность, построив математическую модель оптического прибора, провести на ней компьютерное моделирование различных режимов его работы и оценить качество получаемого результата и степень влияния на него составляющих прибора

и искажений, вносимых ими. Рассмотрим это на примере моделирования действия растрового осветительного устройства.

15. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РАСТРОВОГО ОСВЕТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА.

ФРТ системы, в состав которой входит рассеиватель, $h_{\Sigma}(x)$ определяется сверткой ФРТ системы без рассеивателя с ФРТ рассеивателя.

$$h_{\Sigma} \cong h_{p}(x) \otimes h(x), \qquad (15.1)$$

где как и ранее $h_P(x) - \Phi PT$ ЛР, $h(x) - \Phi PT$ центрированной части ОУ.

Для учета дифракции и аберраций компонента ф применим формулу:

$$h(x) \approx F\{D(x)exp[jk\Phi(x)]\},\$$

где D(x) – зрачковая функция φ , $\Phi(x)$ – функция волновой аберрации φ . Для $h_P(x)$ следует применим формулу: $h_P(x) \cong D_P(x) exp[jk\Phi_P(x)]A$, где $D_P(x)$, $\Phi_P(x)$ – функция зрачка и волновой аберрации линзового элемента растра (ЛЭР), A – множитель многолучевой интерференции.

Если поставить задачу нахождения точного решения интегрального уравнения свертки, то следует понимать, что само это уравнение получено при ряде допущений, например, требование к линейности системы будет выполнено, если разбить область интегрирования на ряд изопланарных зон.

В большинстве случаев точного решения не требуется, что использовать «усредненные» $h_P(x)$ и h(x). Величины $h_P(x)$ и h(x) могут быть рассчитаны точно и усреднение будет связано с распространением этих ФРТ на указанные изопланарные зоны конечной ширины с последующим суммированием.

ФРТ центрированной части ОУ h(x) может быть смоделирована по аналитическому методу вычисления распределения освещенности в изображении точки в геометрическом приближении $h^2(x)$ через детерминант матрицы Якоби:

 $h^{2}(\delta g', \delta G') \sim |(\partial g'/\partial m')(\partial G'/\partial M') - (\partial G'/\partial M')(\partial G'/\partial m')|^{-1}$, (15.2) где $\delta g', G'$ – составляющие поперечных аберраций, m', M' – зрачковые координаты. Частные производные могут быть получены из разложения $\delta g'$ и $\delta G'$:

$$\delta g' = Am'(m'^2 + M'^2) + B\ell(3m'^2 + M'^2) + C\ell^2 m' + E\ell^3,$$

$$\delta G' = AM'(m'^2 + M'^2) + 2B_1\ell m'M' + D\ell^2 M',$$
(15.3)

где *A*, *B*, *C*, *D*, *E* – коэффициенты, не зависящие от координаты луча ℓ и зрачковых координат *M*', *m*' и определяющиеся параметрами оптической системы, например, через коэффициенты Зейделя, положением входного зрачка и объекта. Профессором И.В. Пейсахсоном для осесимметричной системы после перехода к полярным координатам была получена формула: $h^2(\rho') \sim K \rho'^{-4(n-1)/(2n-1)}$, где *K* – постоянный коэффициент, ρ' – координата луча в плоскости изображения, *n* - целое положительное число. При *n*=1, что соответствует наличию дефокусировки, $h^2(\rho')=K$, то есть

светораспределение в пятне рассеяния равномерно и для одномерного случая можем написать: $h(\rho') = rect(\rho'/2\rho'_0)$, где ρ' , ρ'_0 – текущее и максимальное значения радиуса аберрационного кружка. При n=2, что соответствует сферической аберрации 3-го порядка: $h^2(\rho')=K \rho'^{-4/3}$. При стремлении зрачковой координаты ρ к нулю $h^2(\rho')$ стремится к бесконечности, что говорит о грубости геометрического приближения и, тем не менее, светораспределение в изображении точки в этом случае с достаточной точностью можно описать треугольной функцией:

$$h^{2}(\rho') = 1 - \left[\rho' \right] / \rho'_{0}.$$

При наличии чистой комы 3-го порядка функцию $h^2(\rho')$ можно также аппроксимировать треугольным светораспределением. Если источник света, используемый в ОУ, имеет конечные размеры, то в (14.1) появится еще одна свертка при определении светораспределения g(x) на освещаемом объекте:

$$g(x) = h_{\Sigma}(x) \otimes g_0(x), \qquad (15.4)$$

где $g_0(x)$ – функция светораспределения по поверхности идеального изображения СТ источника света. Обычно полагают $g_0(x)$ постоянной по поверхности СТ. Пределы интегрирования определяются в (15.2) размерами СТ. Здесь используется геометрическая модель СТ, понятие габаритной яркости и пр., что является более «грубой» идеализацией по сравнению с использованием усредненных $h_P(x)$ и h(x). Оценим порядок величин и в первую очередь сравним области существования свертываемых в (15.1) и (15.2) функций.

Ранее было показано, что распределение интенсивности в изображении точки, т. е. ФРТ ЛР $h_{p}^{2}(x)$ может быть определено по формуле:

$$h_{\rm p}(x) \approx \sqrt{E(x)} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{2ztg\sigma'_{\rm p}}\right) A,$$
 (15.5)

где z – масштабный множитель, который равен f' или d в зависимости от схемного решения ОУ. Величина $\sqrt{E(x)}$ определяет огибающую и ее влияние является существенным при $\sigma'_p > 0,05$. Значение величины $2z'tg\sigma'_p$ определяет область существования $h_P(x)$.

В соответствии с результатами Д.С.Волосова оптическая система ОУ может считаться хорошо корригированной, если область существования ее ФРТ составляет 0.03÷0.1 от величины изображения СТ источника света. Если эта область составляет 0,2÷0,3 от указанной величины, то аберрации оптической системы ОУ считаются большими. Этими же цифрами определяется отступление ОТ условия синусов. Эти требования определялись для ОУ проекционных систем, если их распространить для ОУ микроскопов, то с одной стороны эти требования можно отнести к коллектору, если ОУ строится по схеме Келера, а с другой стороны к системе, включающей коллектор, конденсор и микрообъектив, так как в плоскость апертурной диафрагмы проецируется СТ источника света. Для объектива 100^x (длина тубуса T=160) с числовой апертурой 0,9 диаметр

апертурной диафрагмы составит 3,2 мм, откуда кружок рассеяния указанной системы составит ~ 0,1 – 0,3 мм при хорошей коррекции аберраций. Сказанное относится к классической схеме освещения по методу Келера. В случае же РОУ, когда при отсутствии в ходе лучей ЛР СТ источника света строится на поверхности освещаемого объекта, подход должен быть иной, а именно, область существования ФРТ ЛР $h_P(x)$ должна быть не менее шага витков спирали СТ источника света. На рис.15.1 приведены экспериментальные данные, полученные на микроскопе Полам–312.



Рис. 15.1

Изображение фиксировалось телекамерой VNC-743. На рис. 15.1 (а) приведено изображение СТ в плоскости ПЗС-матрицы телекамеры, на рис. 15.1 (б) приведено светораспределение в горизонтальном сечении изображения СТ, а на рис. 15.1 (в), (г), (д), (е) приведено светораспределение в изображении СТ после введения в ход лучей ЛР с

апертурой 0,02 (в), 0,05 (г), а также в качестве рассеивателей были использованы матовое стекло (д) и плоскопараллельная пластинка с хаотическим распределением показателя преломления ее материала (е).

Если бы светораспределение по виткам СТ было равномерным, то при использовании ЛР с апертурой 0,02 было бы получено достаточно равномерное светораспределение. Обратим внимание, что в отличие от ЛР (в, г) и хаотического рассеивателя (е), введение в ход лучей матированного стекла (д) не устраняет проявления в изображении СТ витков спирали, но выравнивает светораспределение.

Сказанное иллюстрируется численным примером, в котором светораспределение в изображении СТ источника света моделировалось меандром типа y(x) = |Sinx| (рис. 15.2 а) и $y_1(x)=y(x)z(x)$ (рис.15.2 в), где $z(x) - \phi$ ункция, модулирущюая максимумы функции y(x).

В качестве модулирующей функции z(x) были взяты в одном случае прямоугольная функция, а во втором децентрированная экспоненциальная функция (см. рис. 15.2 б), области существования которых определялись размером СТ источника света. В качестве ФРТ центрированной части ОУ h(x) (см. рис. 15.2 г-и) может быть взята как реальная функция h(x), так и упомянутые выше модели, например, в виде функции $Sinc^2(x)$ (ж) при учете дифракции, а при геометрическом приближении в виде треугольной или гауссовской функции (з), либо в виде прямоугольной функции *rect*(x) (и).

На рис. 15.2 (г), (д), (е) приведены ФРТ конденсора КОН-3, широко используемого в микроскопии, для осевой точки, края освещаемого поля и зоны - 0,5 размера освещаемого поля. В качестве ФРТ ЛЭР $h_p(x)$ можно взять реальную ФРТ, но для простоты были взяты два вида:

 $h_{\rm P}(x) = rect(x/X)$ (рис. 15.2 к) и $h_{\rm P}(x) = rect(x/X)-k\cdot rect(mx/X)$ (рис. 15.2 л), где k < 1, а m > 1. Вторая ФРТ в соответствии с результатами исследований В.Л.Корнейчика имеет пики интенсивности на краях. Области существования ФРТ h(x) были выбраны практически одинаковыми и равными полупериоду функции y(x), а области существования ФРТ ЛЭР $h_{\rm P}(x)$ были выбраны также одинаковыми и равными периоду той же функции y(x).

На микроуровне их действие ощутимо, например, витки спирали СТ размываются. Усилить влияние на макроуровне возможно за счет расширения области существования $h_P(x)$, что в целом не связано с аберрациями ЛЭР, хотя они и оказывают влияние на $h_P(x)$.

На рисунках 15.3 и 15.4 показаны результаты действия на изображение СТ источника света центрированной части РОУ (рис. 15.3, 15.4 а, б, в) и совместное действие ее с ЛР для случаев функции z(x) в виде прямоугольной функции (рис. 15.3 г-и) и экспоненциальной (рис. 15.4 г-и).

Совместное действие центрированной части РОУ с ЛР определялось через двойную операцию свертки. Действие центрированной части РОУ, кроме случая по рис. 15.3 (в) и 15.4 (в) слабое, но для всех трех видов *h*(*x*)

огибающая в светораспределении на изображении СТ повторяет ход огибающей на объекте.



Рис.15.2

Тоже самое можно сказать и о совместном действии центрированной части и ЛР. Этот теоретический результат полностью коррелируется с предыдущим экспериментальным, представленным на рис. 15.1.

Обобщая можно сказать, что действие центрированной части совместно с рассеивателем, действие аберраций которых моделировалось их $\Phi PT - h(x)$ и $h_P(x)$, слабо влияет на ход огибающей светораспределения по объекту, то есть на макроуровне. Здесь мы определяли математическую модель оптической системы и ее элементов через их ΦPT , понятно, что это не единственный способ моделирования.



Рис.15.3



Рассмотрим другие варианты построения модели на примере модели дифракционного оптического элемента и примере модели хода лучей лазерного резонатора, относящегося к периодическим или кратным системам.

16. ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.

Существует класс оптических систем, работа которых основана не на законах геометрической оптики, а на законах волновой оптики. Ярким представителем таких систем является камера обскура (в переводе с латинского темная комната), основным элементом которой является

отверстие в непрозрачном экране (рис. 16.1). Изображение формируется лучами, дифрагировавшими на этом отверстии.



Рис.16.1

На рис. 16.2 (а) приведена ее принципиальная оптическая схема. Каждой точке объекта y соответствует дифракционное пятно на изображении y'. Размер отверстия D должен составлять примерно 0,8 от размера первой зоны Френеля. Напомним формулу для вычисления размеров (радиусов r_M) зон Френеля (рис.16.2 б):

$$r_M = \sqrt{M\lambda \frac{aa'}{(a-a')}}$$
(16.1)

где M – номер зоны Френеля, λ - длина волны. В нашем случае M = 1 и для D получим

$$D \cong 1.6 \sqrt{\lambda \frac{aa'}{(a-a')}}$$
(16.2)

и далее с учетом формулы отрезков для линзы по аналогии получаем формулу для вычисления фокусного расстояния отверстия камеры обскура:

$$f' = \frac{D^2}{2,56\lambda}$$



Рис. 16.2

Явная зависимость фокусного расстояния от длины волны говорит о большом хроматизме такой системы. Светосила системы так же мала, что потребует большого времени экспонирования и обуславливает невозможность снимать динамические процессы.

Светосила может быть повышена за счет включения в процесс образования изображения остальных зон Френеля (четных или нечетных) и мы при этом приходим к зонной пластинке Френеля. Общее действие всех зон Френеля определится суммарной амплитудой *А* всех колебаний, приходящих в точку наблюдения

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots$$
(16.3)

и так как разность хода для соседних зон равна $\lambda/2$, то, перекрыв четные или нечетные зоны, можно получить энергетический выигрыш примерно в M/2 раз, где M номер последней зоны в пластинке.

На рис.16.3 приведено изображение такой зонной пластинки. Для фокусного расстояния зонной пластинки можем использовать формулу

$$f' = \frac{r_M^2}{M\lambda} \tag{16.4}$$

Зонная пластинка является дифракционной решеткой с осевой симметрией, поэтому она имеет несколько фокусов, соответствующих разным порядкам дифракции. Если вместо не прозрачного экрана, перекрывающего четные или не четные зоны устанавливать фазовую кольцевую пластинку для обеспечения нулевой разности фаз колебаний,

101



Рис.16.3

то получим фазовую зонную пластинку Френеля, что также даст энергетический выигрыш по сравнению с амплитудной пластинкой.

Еще больший энергетический эффект дает придание фазовой зонной пластинке свойств эшелетта, являющимся дифракционной решеткой с пилообразным профилем "штриха", геометрия которого определяет "угол блеска" для одного из дифракционных максимумов, например, в максимуме –1 порядка. На рис. 16.4 приведен такой профиль при этом



Рис. 16.4

Рис. 16.4 (а)

 $tg\phi = \Delta x/\Delta y$ и $\Delta x = \lambda/(n - 1)$, где n показатель преломления материала фазового кольца. Такие пластинки получили название "киноформ" или как еще их называют – дифракционный оптический элемент (ДОЭ). Технология изготовления ДОЭ носит промышленный характер, например, ДОЭ может быть изготовлен методами фотолитографии, но нас в большей степени интересуют вопросы работы с киноформом как с оптическим элементом при разработке оптической системы прибора. По этой причине рассмотрим одну из линзовых моделей киноформа, суть которой в замене ДОЭ бесконечно тонкой линзой с большим значением коэффициента преломления, например, n = 10000, что позволяет пользоваться на начальной стадии разработки методами геометрической оптики С последующим переходом к конструктивным параметрам ДОЭ.

В параксиальном приближении для фокусного расстояния **f**' плоско выпуклой линза можем применить формулу:

$$f' = y^2 / 2(n-1)d, \tag{16.5}$$

где *у* - высота луча на преломляющей поверхности линзы (рис.16.5 a), *d* - стрелка прогиба преломляющей поверхности на высоте *у*.

Приравняв фокусные расстояния линзы и зонной пластинки Френеля (ДОЭ) при $y = r_{\rm M}$, получим:

 $(n - 1)d = M\lambda/2$ и далее $r_M^2/2f_{\Pi} = y^2/2f'$, где f_{Π} фокусное расстояние ДОЭ. При стремлении d и λ к нулю получим n = (M + 2)/2 и, т.к. M много больше единицы получим значение показателя преломления линзы так же много больше единицы.

Применим к ДОЭ формулу дифракционной решетки для первого порядка:

 $n_3Sin\Theta' - n_1Sin\Theta = \lambda/(r_{\rm M} - r_{\rm M-1}),$

где **O** и **O**' углы падения и дифракции пучка лучей проходящих ДОЭ (рис.16 б). Положим, что на эквивалентную ДОЭ линзу падает луч под углом к оптической оси **O** и выходит из нее под углом **O**', применив



Рис. 16.5

формулу для расчета хода нулевого луча через тонкий компонент, получим: $n_3 tg\Theta' - n_1 tg\Theta = yn_3 \varphi$, где φ - оптическая сила линзы, для которой применим формулу: $\varphi = [(n_2 - n_1)/r_1 - (n_2 - n_3)/r_2]/n_3$, где r_1 и r_2 радиусы кривизны тонкой линзы. Для наших приближений значения функций "*Sin*" и "tg" равны, поэтому:

$$n_3Sin\Theta' - n_1Sin\Theta = y[(n_2 - n_1)/r_1 - (n_2 - n_3)/r_2]$$

и далее можем написать

 $\lambda/(r_{\rm M} - r_{\rm M-1}) = y[(n_2 - n_1)/r_1 - (n_2 - n_3)/r_2].$ (16.6)

Отношения y/r_1 и y/r_2 определяют значения тангенсов углов луча с нормалями к поверхностям линзы на входе ψ_1 и на выходе ψ_2 .

Из аналитической геометрии известно, что

$$tg\psi_1 = -dx_1/dy \text{ is } tg\psi_2 = -dx_2/dy$$
 (16.7)

откуда получаем уравнение

x

$$\lambda/(r_{\rm M} - r_{\rm M-1}) = (n_2 - n_3)/(dx_2/dy) - (n_2 - n_1)/(dx_1/dy)$$
(16.8)

В общем случае для преломляющей поверхности имеем уравнение

$$= y^2/2r + A_2y^4 + A_3y^6 + \dots, (16.9)$$

значения *r* и *A*₂, *A*₃ и т.д. вычисляются при аберрационном расчете системы по законам геометрической оптики.

При выполнении расчета значение показателя преломления линзы эквивалентной ДОЭ берется не менее 10. Один из показателей преломления n_1 или n_2 в зависимости от ориентации подложки ДОЭ, на которую наносится фазовая зонная пластинка, равен показателю преломления материала подложки, а другой равен показателю преломления материала фазового слоя.

Таким образом, получив методами геометрической оптики уравнения преломляющих поверхностей и уравнение связи фокусных расстояний линзы и ДОЭ с параметрами линзы, решают эту систему уравнений с учетом, что

$$r_{\rm M} = \sqrt{M\lambda f'}$$

Вычисляются разности $r_{M}-r_{M-1}=\Delta y$ и $\Delta x=\lambda/(n-1)$, где п показатель преломления материала фазового слоя. Обратим внимание на рис. 16.5 (в), где показано как пилообразный профиль практически реализуется ступенчатой функцией. Отметим так же, что М может принимать значения 400 и выше, $\Delta y=2,5$ мкм, значение фокусного расстояния от 10 мм и выше. Разумеется, имеются и другие методики расчета ДОЭ, но мы здесь рассмотрели именно эту, позволяющую использовать методы геометрической оптики.

17. КРАТНЫЕ (ПЕРИОДИЧЕСКИЕ) ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.

Существует класс оптических систем, в которых наблюдается периодичность как в ходе лучей, так и в самой оптической системе. К таковым относятся светопроводы, устойчивые лазерные оптические резонаторы, многолучевые интерферометры, например, интерферометр Фабри – Перро (рис.17.1) и пр.

Рассмотрим их на примере двухзеркального пустого симметричного лазерного резонатора. На рис. 17.2 (а) приведена оптическая схема такого

резонатора, а на рис.17.2 (б) приведен фрагмент его зеркальной развертки, включающий три акта отражения луча, начиная с к-1 –го отражения.



Рис.17.1

В этой развертке заменим развертку каждого из зеркал тонким компонентом ϕ_{κ} , где κ номер отражения. Одновременно через ϕ_{κ} будем обозначать оптическую силу κ – го тонкого компонента и всех остальных.

Лучи внутри лазерного резонатора распространяются в области близкой к оптической оси, поэтому при расчете хода действительного луча через компоненты ϕ_{κ} можно применить формулы для расчета хода нулевых лучей: $\sigma_{\kappa+1} = \sigma_{\kappa} + \mathbf{h}_{r} \phi_{\kappa}$ и $h_{\kappa+1} = h_{\kappa} - \sigma_{\kappa+1} d.$ (17.1)

По причине, что число отражений в такой системе может составлять несколько тысяч, последовательное применение расчетных формул не разумно.

Рассмотрим прием решения этой задачи из []. Прохождение луча через компоненты $\phi_{\kappa-1}$, ϕ_{κ} и $\phi_{\kappa+1}$ определит три высоты через уравнения

 $h_{\kappa} = h_{\kappa-1} - \sigma_{\kappa+1}d$ и $h_{r+1} = h_{\kappa} - \sigma_{\kappa+1}d$. Вычтем из второго уравнения



Рис. 17.2

первое, тогда после преобразований будем иметь

$$h_{\kappa+1} - 2h_{\kappa} + h_{\kappa-1} = -d(\sigma_{\kappa+1} - \sigma_{\kappa}) = -dh_{\kappa}\phi_{\kappa}.$$
(17.2)

Если рассматривать h_{κ} как функцию от некоторого аргумента x, меняющегося дискретно на значение величина d, то в последнем выражении просматривается вторая разность $\Delta^2 h$ этой функции h(x). Отсюда пишем

$$\Delta^2 h = -d h_{\kappa} \varphi_{\kappa}. \tag{17.3}$$

Вторая разность $\Delta^2 h$ функции $\dot{h}(x)$ связана с ее второй производной h''(x) и приращением аргумента Δx формулой:

$$\Delta^2 h = h''(x) \Delta x^2. \tag{17.4}$$

В нашем случае высоты h_k и углы σ_k малы, поэтому можно воспользоваться этой формулой при $\Delta x = d$, откуда (17.5)

$$\Delta^{2} h = h''(x) d^{2}$$
(17.5)

или с учетом ранее полученных результатов $h''(x) = -h_k \varphi_k/d$.

Это дифференциальное уравнение второго порядка имеет общее решение следующего вида:

$$h_{\kappa} = C_1 Cos\left(kd\sqrt{\frac{\varphi_{\kappa}}{d}}\right) + C_2 Sin\left(kd\sqrt{\frac{\varphi_{\kappa}}{d}}\right), \qquad (17.6)$$

где C_1 и C_2 постоянные.

Положим, что
$$Cos\theta = \frac{C_2}{\sqrt{C_1 + C_2}}$$
; $Sin\theta = \frac{C_1}{\sqrt{C_1 + C_2}}$; $A = \sqrt{C_1^2 + \frac{2}{2}}$,

тогда можно написать:

$$h_k = ASin(k\sqrt{\varphi_k d} + \Theta).$$
(17.7)

Значения величины A и начальной фазы Θ определим из начальных условий при к = 0, σ_1 = 0 и высоте $h_1 = h_0$. После подстановки получим:

 $h_{\rm k} = ASin\Theta$ при k = 0;

$$h_1 = ASin(k\sqrt{\varphi_k d} + \Theta)$$
 при $k = 1$.

Тогда для разности $h_0 - h_1$, будем иметь

$$h_0 - h_1 = A \left[Sin\Theta - Sin\left(\sqrt{\varphi_k d} + \Theta \right) \right] = 0.$$
(17.9)

Одно из решений этого уравнения сводится к случаю (элементарные тригонометрические преобразования опускаем): $Cos[0,5(\sqrt{\varphi_k d} + 2\Theta)] = 0$, что имеет место при $\sqrt{\varphi_k d} + 2\Theta = \pi$ или для Θ имеем:

$$\boldsymbol{\Theta} = \mathbf{0}, \mathbf{5} \Big(\pi - \sqrt{\boldsymbol{\varphi}_k d} \Big). \tag{17.10}$$

Затем для коэффициента А получаем:

$$A = \frac{h_0}{Cos(0, 5\sqrt{\varphi_k d})}.$$
 (17.11)

В итоге для *h*_k после преобразований получаем

$$h_k = h_0 \frac{Cos[(k-0,5)\sqrt{\varphi_k d}]}{Cos(0,5\sqrt{\varphi_k d})}$$
(16.12)

Для углов σ_к имеем

$$\sigma_{k+1} = -(h_{r+1} - h_k)/d. \tag{17.13}$$

После всех тривиальных преобразований с учетом формулы для вычисления *А* получим:

$$\sigma_{k+1} = 2h_0 \frac{Sin(k\sqrt{\varphi_k d})tg(0,5)\sqrt{\varphi_k d}}{d}.$$
(17.14)

18. СИСТЕМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ (ИЗОБРАЖЕНИЯ).

К системам отображения информации (СОИ) в широком понимании можно отнести простой лист бумаги с текстом, например, газетный лист. Одновременно к СОИ можно отнести и ту аппаратуру, которая делает распечатку на газетном листе, например, печатную машину или принтер. В настоящее время под СОИ чаще всего понимают устройства воспроизводящие телевизионные изображения. На рис. 17.1 приведен



Рис. 18.1

пример цепочки от системы сбора информации – микроскопа до СОИ, в качестве которой может выступать ЖК-экран, экран монитора с ЭЛТ, принтер, фотопринтер и пр

Начнем с простых примеров СОИ. Среди самых известных СОИ следует отметить в первую очередь хорошо известный экран, на который проецируется изображение, например, киноэкран, задача которого сводится к рассеянию падающего на него света в заданной зоне, где наблюдатели кинозал. Экран позволяет наблюдать находятся _ изображение сразу нескольким наблюдателям. Существует большое количество реализаций экранов. Они хорошо описаны в литературе. Все эти экраны относятся к пассивным системам, т.е. на их поверхности проецируется изображение и их задача – это задача рассеивателя.

Экраны бывают отражающими и просветными (рис. 18.2), особняком стоят экраны для реализации стереоизображений, которые строятся по



Рис. 18.2

принципу растр-коллектива.

Существует понятие силовой экран, который переносит выходной зрачок проекционного объектива в зону, где находятся глаза наблюдателя (рис. 18.3).



Рис. 18.3

 $\varphi_{3\kappa p.}$ – обычно комбинация рассеивателя и линзы, например, линзы Френеля. Здесь «*B*» - размер зоны видения: $B = 2Ltg\sigma'_{ob}$. Значение *B* может быть определено, например, через глазную базу. На рис. 18.4 приведен пример использования такого экрана в микроскопии. Возможно построение СОИ с полупрозрачным зеркалом (рис. 18.5).



Такие системы использовались в телецентрах: диктор-текст (*AB*). По такой схеме может строиться система для проецирования в поле зрения пилота или водителя автомобиля приборной доски. Приборная доска может быть спроецирована на лобовое стекло кабины. Здесь лобовое стекло кабины выполняет функцию экрана. Эти же принципы используются и в виртуальных системах персонального типа.



Рис.18.5

На рис. 18.6 приведена схема ВУ (виртуального устройства) с одним микродисплеем (МД), находящимся в переднем фокусе объектива. При проектировании таких систем одна из главных проблем – это задача правильной передачи перспективы.



Рис.18.6

В качестве системы коллективного пользования вероятней всего мы придем к электронной панели, например, плазменной, которая так же как и все остальные, например, ЖК-панели, относится к классу матричных индикаторов, в которых управление ячейками производится в простейшем случае с помощью двух перпендикулярных систем электродов. При приложении к вертикальному и горизонтальному электродам напряжений, в сумме превышающих напряжение зажигания, в ячейке возникает газовый разряд, ограниченный барьерами. УФ излучение газового разряда возбуждает фотолюминофор, излучающий свет красного, зеленого или синего цвета. Люминофор обычно наносится на дно и боковые стенки ячейки, а иногда - тонким полупрозрачным слоем и на потолок ячейки. Верхняя система электродов делается прозрачной или достаточно узкой для того, чтобы не препятствовать выходу света. Три или четыре ячейки с разными цветами свечения образуют квадратный пиксел, как это показано на рис 18.7.



Но это уже не проекция, а скорее всего телевидение. Прежде, чем перейдем к рассмотрению основных характеристик дисплеев вернемся к газете с учетом понятия электронная бумага, для чего приведен фрагмент текста из интернет–статьи. "Электронная бумага".

Наряду с активными работами по совершенствованию конструкции излучающих дисплеев (ЖК, плазменных, FED, OLED и др.) в последнее время исследователи ряда крупных компаний проявляют живейший интерес к отражающим дисплеям. По эксплуатационным качествам отражающие дисплеи схожи с обычной бумагой — не случайно о них часто говорят, как об электронной бумаге. Структурными элементами отражающих на базе электронных чернил лисплеев являются микрокапсулы, диаметр которых не больше толщины человеческого волоса. Внутри каждой микрокапсулы (рис. 18.8) находится большое количество пигментных частиц двух цветов: положительно заряженные белые и отрицательно заряженные черные, а все внутреннее пространство микрокапсулы заполнено прозрачной жидкостью.



Микрокапсула — основной структурный элемент дисплеев на базе электронных чернил. Слой микрокапсул расположен между двумя рядами взаимно перпендикулярных гибких электродов (сверху — прозрачных, снизу — непрозрачных), образующих адресную сетку. При подаче напряжения на два взаимно перпендикулярных электрода в точке их пересечения возникает электрическое поле, под действием которого в расположенной между ними микрокапсуле группируются пигментные частицы. Частицы с одним зарядом собираются в верхней части микрокапсулы, а с противоположным — в нижней. Для того чтобы поменять цвет точки экрана с белого на черный или наоборот, достаточно изменить полярность напряжения, поданного на соответствующую пару электродов. Таким образом, пиксел экрана, соответствующий данной микрокапсуле, окрасится в черный либо в белый цвет; при этом пигментные частицы, сгруппировавшиеся в верхней части микрокапсулы, скроют от взгляда наблюдателя все частицы, сосредоточенные в ее нижней части.



Схематическое изображение структуры дисплея на базе электронных чернил

Описанная модель позволяет создавать монохромные дисплеи с однобитной разрядностью, то есть каждый из пикселов экрана может быть либо белым, либо черным. Если же один управляющий состоянием микрокапсулы электрод заменить двумя, то станет возможным формирование полутонов за счет закрашивания одной половины микрокапсулы в белый цвет, а другой половины — в черный. Принцип повышения разрешающей способности дисплея за счет увеличения количества управляющих электродов.



Рис. 18.10

В качестве подложки для создания дисплея на основе электронных чернил можно использовать практически любые материалы: стекло,

пластик, ткань и даже бумагу. А это, в свою очередь, открывает перспективы создания ультратонких гибких дисплеев, максимально близких по своим механическим и оптическим характеристикам к обычной бумаге.

of having nothing to do: once or twice ister was reading, but it had no pictur the use of a book,' thought Alice 'w considering in her own mind (a made el very sleepy and stupid) sy-chain we be worth the trouble c es, when suddenly a White Rabbit wit e was nothing so very remarkable in the much out of the way to hear the Rabb

I shall be late!' (when she thought it Так выглядит изображение на одном из прототипов отражающего дисплея.

В настоящее время технологически достижимо создание отражающих дисплеев с очень высокой разрешающей способностью. Так, один из созданных учеными прототипов позволяет воспроизводить монохромное изображение с разрешением 400 dpi.

Но, пожалуй, важнейшим достоинством отражающих дисплеев является хорошая читаемость изображения при самых разных условиях освещения — от сумерек до яркого полуденного солнца. Подобно изображению, отпечатанному на бумаге, картинка на экране отражающего дисплея отлично видна под любым углом, причем без потери контраста.



Прототип устройства для чтения

электронных книг, оснащенный двумя отражающими дисплеями на базе электронных чернил (фото *Philips*)".

Для реализации электронной бумаги требуются СОИ, для которых не требуется осветительная система. К таким СОИ относятся **OLED** – дисплеи, для которых также приведем фрагмент из интернет – статьи.

"OLED"

Принципиальное отличие **OLED**-дисплеев от доминирующих в настоящее время ЖК-устройств заключается в использовании для формирования изображения органических веществ, излучающих свет под действием электрического поля. Благодаря этому в **OLED**-дисплеях отпадает необходимость использовать лампу подсветки, поляризующие пленки и ряд других компонентов. За счет более простой структуры **OLED**-дисплеи можно сделать чрезвычайно тонкими и легкими. Кроме того, **OLED**-дисплеи могут работать от меньшего (по сравнению с ЖК) напряжения, обладают низким уровнем энерогопотребления и выделяют незначительное количество тепла.

Пока срок службы существующих прототипов полноцветных **OLED**дисплеев с размером экрана порядка 15-17" по диагонали составляет около 2 тыс. часов. Однако для коммерческого использования необходимо достичь показателя как минимум в 10 тыс. часов. Впрочем, по словам разработчиков, эту проблему можно решить в течение ближайших двухтрех лет.

Сегодня ЖК-технология занимает доминирующее положение на рынке массовых электронных дисплеев. Однако период ее господства вряд ли будет продолжительным: на горизонте уже отчетливо просматриваются конкурирующие решения, каждое из которых имеет свои преимущества.

Исходя из текущего положения дел наиболее грозным конкурентом ЖК-дисплеев являются устройства на базе **OLED**. Даже нынешние, весьма несовершенные в техническом плане прототипы **OLED**-дисплеев по целому ряду параметров значительно выигрывают по сравнению с ЖК-дисплеями. И как только разработчикам удастся увеличить срок службы **OLED**-дисплеев до приемлемого (с точки зрения коммерческого использования) значения, дни ЖК-дисплеев будут сочтены.



Возможно, уже через пару лет

полноцветный дисплей для просмотра телепередач сможет уместиться в корпусе наручных часов".

19. ДИСПЛЕИ.

В предыдущем разделе были рассмотрены СОИ – киноэкран (рассеивающий), силовой экран, вариант использования в качестве экрана лобового стекла кабины транспортного средства, рассмотрены варианты построения виртуальных устройств с микродисплеем, к которым относятся дисплеи с размером диагонали $0,5 \div 4,5$ см. Основным элементом любого дисплея является видеопреобразователь «сигнал-свет». *А*: электронная пушка *В*: отклоняющая система *C*: пучок электронов *D*: люминесцентный экран. Ярким представителем СОИ является – ЭЛТ – кинескоп (рис. 19.1)

а), в котором изображение отображается на люминесцентном экране, где производится телевизионная развертка модулированным электронным лучом. Элемент изображения, его размер, определяется размером бегущего пятна, диаметр которого определяет ширину телевизионной строки. ЭЛТ развиваются до сих пор, но постепенно вытесняются более современными системами – ЖК панелями и плазменными экранами. Яркость экрана ЭЛТ обычно не превышает 900÷1000 нт. Важной характеристикой также является длительность кадра T_n , которая равна приблизительно 40 мс. Остаточная яркость концу кадра не превышает 5%. ЭЛТ имеет световую характеристику вида, представленного на рис. 19.1 (б).

Современные СОИ строятся по принципу управляемого транспаранта, состоящего из отдельных элементов, каждый из которых под действием управляющего сигнала модулирует свет и тем самым создается мозаичное изображение.



Рис. 19.1

б

На рис. 19.2 (в) отображено соотношение количества *SFT/S- IPS*) с телевизионным сигналом стандарта *NTSC* откуда видно, что остальным панелям ещё сложнее состязаться с качеством даже телевизионного изображения на ЭЛТ. Рассмотрим принцип действия некоторых из них.

а



Рис. 19.2 а, б



Рис. 19.2 в, г

На рис. 19.3 (а) показана конструкция электролюминесцентного элемента, представляющего собой плоский конденсатор. При приложении электрического напряжения вызывается люминесценция слоя люминофора



Рис.19.3

между пластинами. Имеющийся набор люминофоров позволяет иметь три цветных источника света в системе КЗС, что обеспечивает отображение цветных изображений. На рис. 19.3 (б) приведен вариант элемента с жидким кристаллом (ЖК), где под действием электрического поля изменяется значение величины

$$\Delta n = (n_{\theta} - n_{e})Sin^{2}(\psi), \qquad (19.1)$$

так как молекулы ЖК разворачиваются и при этом меняется угол между оптической осью кристалла и направлением распространения света ψ . При этом модулируется поток:

$$\Phi \sim Sin^2(\pi d\Delta n/\lambda), \qquad (19.2)$$

где λ - длина волны, n_0 и n_e – показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей. Значение Δn составляет около 0,3. Элемент ЖК может работать на просвет или на отражение. Цветное изображение получается за счет использования цветных фильтров. Коэффициент пропускания ЖК-ячейки составляет около 10%. Отдельным элементом дисплея может выступить светодиод. Матрица из элементов отображения

(ЭО) формирует дисплей. Итак, дисплеи могут быть пропускающие (рис. 19.4 а), отражательные (рис. 19.4 б) и светоизлучающие (рис. 19.4 в).

характеристиками дисплеев Основными являются апертура, контрастность и разрешение. Апертура – отношение рабочей площади ЭО к его общей площади. Контрастность – отношение «белой» точки к «черной» точке. Например, при контрастности 3:1 считываются буквы и цифры (знаки), при 10:1 комфортно считывается изображение (полутоновое), при 100:1 не требуется дополнительной адаптации глаз. Ниже в таблицах приведены сведения по характеристикам дисплеев.

			I аол.
Формат изображения	Разрешение	Аспектное отношение	Число ЭО (тыс.)
OVGA	320×240	4:3	76,8
VGA	640×480	4:3	307,2
SVGA	800×600	4:3	480
XGA	1024×768	4:3	786,4
HDTV(720ip)	1280×720	16:9	921,6
SXGA	1280×1024	5:4	1319,7
HXGA	1600×1200	4:3	1920
HDTV1080ip)	1920×1080	16:9	2073,6
VXGA	2048×2048	1:1	4194,3
GXGA/QSXGA	2560×2048	5:4	5242,9
PhotoCD(16base)	3072×2048	3:2	6291,5
PhotoCD(64base)	6144×4098	3:2	25178,1

Аспектное отношение – отношение горизонтального размера экрана к вертикальному.

Тип изображ.	Расстояние до объекта	Размер изображения по горизонтали	Разрешение	Угловой размер ОЭ (мрад)	
Страница текста	25 см	20 см	80 лин/см	1,71	
ЭЛТ монитор	50 см	25 см	0,27 мм	1,78	
Проекционный экран	250 см	1200 см	1024 лин	1,91	
МД	25 мм	10 мм	800 лин	0,16	

Основные параметры отображений различного типа.

МД –микродисплей

Размер	Формат	Doopaulaulua	Papuen () 3	Яркость
(диагональ)	изображения	взображения		(нт)
6,5*	VGA	640×480	0,207×0,207	300
10,4*	SVGA	800×600	0,264×0,264	350
15*	XGA	1024×768	0,247×0,247	400
20,1**	UXGA	1600×1200		1000
24**	WUXGA	1920×1200		1000

Типичные характеристики ЖК - дисплеев (диагональ более 10'').

* Контрастность 300:1
** Контрастность 500:1
Время реакции (отклика) 10 ÷ 40 мс
Срок службы ЖКД ~ 50 000 ч
Срок службы лампы ~ 20 000 ч
Срок службы СД ~ 50 000 ч
т – коэффициент пропускания ~ 10-12%

Число градаций в зависимости от разрядности кодирования

Число бит	Число градаций/цветовых оттенков		
на один цвет	Монохроматич. пиксел	Основной RGB субь	
1	2(2')	8	
4	$16(2^4)$	4096	
8	$256(2^8)$	16,77 млн	
16	6536(2 ¹⁶)	$2,81 \cdot 10^{14}$	
24	$1,68 \cdot 10^7 (2^{24})$	$4,72 \cdot 10^{21}$	

графические Дисплеи бывают телевизионные. Примером И графического дисплея является дисплей мобильного телефона, но с телекамерой ОН уже должен быть телевизионным. Важной характеристикой дисплея является зона видения. Ее размеры зависят от решаемых задач. Например, для дисплея виртуального устройства, где глаз наблюдателя фиксирован относительно дисплея, зона видения мала, но тем не менее она имеет конечные размеры

В виртуальных системах в ЖК – дисплеях (рис. 19.5) обычно нет



Рис. 19.5

рассеивателей, но в дисплее для транспортного средства и др. без рассеивателей не обойтись, так как зона видения большая, что необходимо для обеспечения возможности совместной работы группе наблюдателей. Дисплеи могут быть использованы и в качестве экрана, а в качестве управляемого транспаранта – также СОИ.

На рис. 19.6 приведены две схемы построения проекционной системы. В варианте по рис. 19.6 (а) используется один черно-белый МД, а цвет получается за счет периодического освещения тремя цветными потоками RGB при вращении диска со светофильтрами. В варианте по рис. 19.6 (б)



Рис. 19.6 а



Рис. 19.6 б

используется три так же черно-белых МД. Цвет получается за счет использования системы цветоделения при одновременном наложении трех цветных изображений друг на друга. Управление оптическими характеристиками ЖК-дисплеев производится модуляцией управляющего напряжения на ЭО. Для получения изображения с заданным количеством полутонов необходимо:

- 1. Разрядность входного видеосигнала должна обеспечивать требуемый диапазон.
- 2. Необходима поддержка заданного диапазона самих ЖКД.

Первое обеспечивается видеоконтроллером, а второе числом градаций шкалы серого для каждого ЭО. N=2ⁿ, где N-число оттенков серого, n-

разрядность кодирования ЭО.

На рис. 19.7. представлена вольтконтрастная характеристика ЖКД.

Существует прямая модуляция τ , но дешевле использовать пространственную или временную модуляцию. При пространственной модуляции градации по яркости осуществляются за счет интегрирования глазом средней яркости по нескольким соседним кадрам. Возможна комбинация методов модуляции. Прямая модуляция производится прямо на линейном участке A-B вольт-контрастной характеристики τ/u (рис. 19.7).



Покадровая или временная модуляция - интегрирование глазом



Рис. 19.8

состояния пиксела за несколько соседних кадров (рис. 19.8 а).

Пространственная модуляция (рис. 19.8 б)

Из сказанного следует, что разрешение ЖК-дисплея определяется не только числом строк и столбов в матрице.

Отметим, что в ЖК-дисплеях есть возможность динамического управления яркостью и контрастом (регулировка задней подсветки).

20. РОЛЬ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА В СОСТАВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА (А Р М).

С появлением в широкой практике персональных компьютеров позволили развиваться новому классу систем – компьютеризированных или автоматизированных рабочих мест (APM), в состав которых помимо

компьютера входит система сбора информации, в роли которой может выступать оптический прибор или группа и не обязательно оптических приборов, датчиков и пр.

На рис. 20.1 приведен пример АРМ – врача (цитолога, морфолога и пр.),



Рис. 20.1

криминалиста, материаловеда, и пр. В приведенном рис. 20.1 АРМ в качестве системы сбора информации выступает световой микроскоп, снабженный телекамерой или видеокамерой (ТК). В первых АРМ использовались телекамеры на видиконах, теперь это телекамеры с твердотельными приемниками ПЗС или КМОП матрицами.

Развитие цифровых методов обработки изображений выразилось в появлении нового класса приборов – цифровых фотоаппаратов, проекторов, микроскопов и пр. Эти методы в первую очередь развивались в телевидении – вещательном и промышленном, системах технического зрения (СТЗ). Мы коснемся по ряду причин микроскопов, хотя вопросы, которые мы будем рассматривать, носят общий характер.

Микроскоп исследовательского типа содержит обычно несколько каналов: визуальный, телевизионный (ТВ-канал), фотографический, а иногда и спектрофотометрический. Очень важным при этом является адекватность получаемых изображений в этих каналах. Замечено, что качество изображения в ТВ-канале обычно хуже, чем в визуальном. Последнее объясняется усредняющим и дискретизирующим действием ТК и необходимостью при этом соблюдения критерия Найквиста или более жесткого критерия. По этой причине ТВ-изображение, прежде чем начать с ним работать, подвергают предварительной обработке – фильтрации, контрастированию, бинаризации и пр. Следует также отметить появление понятия «сырого видео» В последнее время когда предобработка изображения отсутствует. После предобработки изображения с ним начинают работать измерять линейные размеры, площади, фотометрировать, получая при этом информацию об оптической плотности изображения, цветовых характеристиках и пр.

Оценка качества изображения при этом осуществляется не с использованием физиологических критериев, а информационных. Тем

более, что математически изображение представлено в виде массива чисел в двоичном коде. Информационное содержание в объекте избыточно и не может быть реализовано прибором, поэтому не следует относиться к качеству изображения очень строго.

Начнем с рассмотрения полезного увеличения оптической системы телеканала, используя физиологический и информационный подходы. При первом подходе используется понятие остроты зрения глаза наблюдателя. Известно, что для общего увеличения телеканала β_Σ справедлива формула:

$$\boldsymbol{\beta}_{\boldsymbol{\Sigma}} = \mathbf{1}, \mathbf{2}A\boldsymbol{\ell}, \tag{20.1}$$

где A – числовая апертура микрообъектива, ℓ - расстояние от наблюдателя до экрана монитора [мм]. Одновременно справедливо написать $\beta_{\Sigma} = \beta \beta_{T}$, где β - увеличение оптической системы телеканала, β_{T} – увеличение телекамеры (ТК в дальнейшем), определяемое через отношение $\beta_{T} = H/h$, где h – размер фотоприемной части телекамеры (ТК в дальнейшем), H – размер экрана монитора. Обычно имеет место соотношение $\ell = (3 \div 6)H$ и при $\ell = 5H$ для β получим:

$$\boldsymbol{\beta} = -\boldsymbol{6}\boldsymbol{A}\boldsymbol{h}. \tag{20.2}$$

Если задаться A = 1 и h = 10 мм, то $\beta = -60^{x}$. Известно, что, используя информационный подход, целесообразно для достижения «потенциальной точности» воспроизведения иметь радиус r импульсной характеристики оптической системы - ФРТ несколько меньше элемента разложения изображения на фотоприемнике ТК. Этот радиус может быть определен, например, радиусом диска Эри. Размер элемента разложения изображения б определится или шириной строки телевизионной развертки, или размером ячейки (пикселя) в случае твердотельной ТК. Понятно, что для β будет иметь место $\beta = \delta/r_{3}$, где r_{3} – радиус диска Эри, отнесенный к пространству предметов. Известна формула:

$$\beta \cong Ah/(0,57\lambda n_1), \tag{20.3}$$

где *n*₁ - число строк (или столбцов) на фотоприемнике ТК.

Если принять $n_1 = 625$, A = 1, $\lambda = 0,0006$ мм и h = 10 мм, то $\beta = -47^x$, что по порядку величин соответствует случаю физиологического подхода.

Обычно рассматривают канал прибора, как линейную систему, что позволяет использовать понятие ПФ и результирующая ПФ сложной системы есть произведение ПФ отдельных частей ОС.

Геометрическая ПФ ТК определяется по формуле

$$V(N') = \frac{Sin(\pi m)}{\pi m},$$
(20.4)

где $m = \delta N'$, δ – шаг матрицы, N'- пространственная частота изображения на матрице.

Кроме геометрической ПФ существует еще два вида ПФ, которые связаны с активностью переносов носителей зарядов и диффузией носителей в подложке, последняя ПФ зависит от длины волны излучения и может оказывать существенное влияние на результирующую ПФ,

определяемую произведением трех перечисленных составляющих. Контраст изображения может быть снижен в четыре раза по сравнению со случаем учета только геометрической ПФ. Для ОС примем треугольную аппроксимацию ПФ

$$T(N') = 1 - \frac{|N'|}{N'_0},$$
 (20.5)

N[']₀ – предельная пространственная частота.

Например,
$$N' = \frac{2A'}{\pi}$$
.
 $\Theta(N') = T(N') \cdot V(N')$ (20.6)

Спектр изображения в визуальном канале определяется $G'_B(N') = T(N') \cdot G(N')$, а в ТВ-канале: $G'_T(N') = T(N') \cdot V(N') \cdot G(N')$.

Если перейти к KO, то контраст оптического изображения равным единице сделать возможно (T(N) = 1), но выполнить равенство V(N) = 1 не удастся. В целом можно констатировать, что ТК во многом более, чем оптическая системы снижает качество изображения.

Изображение объекта в итоге выводится на экран СОИ, например ЖКдисплея, с которого оно рассматривается оператором. Его также необходимо отфильтровать, что осуществляется зрачком глаза наблюдателя, фильтрующие свойства которого зависят от расстояния между наблюдателем и изображением. Если при этой фильтрации пропускаются составляющие двух соседних спектров за счет большей ширины ПФ фильтра, то имеем сигнал:

$$t'(x) = 1 + \Theta_{\Gamma}(f_0) Cos(2\pi x f_0) + \Theta_{\Gamma}\left(\frac{1}{\delta} - f_0\right) \cdot Cos\left[2\pi x \left(\frac{1}{\delta} - f_0\right)\right]$$
(20.7)

где $\Theta_{\Gamma}(f_0)$ - передаточная функция системы, включающей глаз наблюдателя. При этом: $\Theta_{\Gamma}(N_0) = T_{\Gamma}(N)V_d(N)$, где $V_d(N)$ – передаточная функция дисплея, определяемая по аналогии с V(N) по формуле:

$$V_d(N') = \frac{Sin(\pi m)}{\pi m}, \quad m = \frac{\delta}{\rho'} = \delta N', \quad (20.8)$$

 $T_{\Gamma}(N)$ – передаточная функция глаза, для которой можно применить формулу:

$$T_{\Gamma}(H) = exp\left[-\left(\frac{N}{690}\right)^2\right].$$
(20.9)

Присутствие третьего слагаемого (высокочастотная составляющая) и определяет искажения второго рода. Обычно искажения первого и второго рода присутствуют одновременно. Для минимизации действия искажений помимо правильности выбора увеличения β оптической системы телеканала необходимо перед первой дискретизацией отфильтровывать высокочастотные составляющие в спектре объекта $G_0(f)$, что возможно затягиванием апертурной диафрагмы конденсора ОУ, так как согласно

формуле Д.С.Рождественского: $N_0 = \frac{(A_0 + A)}{\lambda}$, где A_0 , A – апертуры ОУ и

системы, строящей изображение. При этом повышается степень объекта. сужается когерентности освещения полоса пропускания оптической системы телеканала, то есть регулируется ширина ПФ, но одновременно система становится нелинейной. Таким образом, между объектом и глазом наблюдателя в визуальном канале располагается оптическая система микроскопа, а в телеканале после микроскопа устанавливается телекамера, канал связи и СОИ – дисплей монитора, что, естественно, приводит к снижению качества оконечного изображения на сетчатке глаза наблюдателя. Если же еще требуется документировать наблюдений, то в цепочке формирования оконечного результаты изображения появляется еще и принтер, где также происходит усреднение и дискретизация изображения или, как говорят связисты, появляются апертурные искажения, может появиться муар, будут нарушения в цветопередаче и пр.

На рис. 20.2 приведен внешний вид APM – криминалиста производства ОАО "ЛОМО". В состав APM входят два компьютера – стационарный (показан на рис.2) и переносной типа ноутбук (на рис. 20.2 не показан, как не показан и принтер). Помимо визуального канала предусмотрен телевизионный канал и канал спектрофотометрирования.

На рис. 20.3 (б) показано тестовое изображение (объект-микрометр, цена деления 0,005мм) при работе с микрообъективом 40^x×0,65, на рис. 20.3 (а) показано окно программы при выбранном режиме «Спектрофотометр».



Рис. 20.2

В состав АРМ входят: 1 - штатив, 2 - тубус, 3 - фонарь лампы,

4 - микроспектрофотометрическая насадка, 5 – тринокулярная насадка,

6 – телекамера, 7 – лазерный осветитель, 8 – револьверное устройство крепления микрообъективов, 9- предметный стол, 10 - фокусировочный

механизм, 11 – ЖК-монитор, 12– процессор стационарной ПЭВМ, 13 – клавиатура, 14 - мышь.



В телеканале использована цветная 5-ти мегапиксельная камера ЗАО "ЭВС", что позволяет в режиме "Видеокамера" иметь частоту кадров не более 2 кадров в секунду, поэтому для увеличения частоты кадров до 30 имеются регулировки (рис. 20.4) для изменения формата кадра до 320×240 .



Рис. 20.4

В телеканале имеется режим накопления кадров, а в режиме "Спектрофотометр" предусмотрена возможность циклической записи спектров с одновременным усреднением результатов измерений. Количество циклов можно регулировать до 1000 циклов.

В режиме "Спектрофотометр" прописываются спектры отражений объектов, а так же спектры их люминесценции в интервале от 240 нм до 1100 нм. Спектрофотометрирование осуществляется по однолучевой поэтому приборе предусмотрен режим "Калибровка", схеме, В осуществляющийся по эталонным образцам, входящим в состав прибора и которых занесены в память компьютера. При калибровке спектры люминесценции используется светодиодный спектров эталон co светодиодом белого свечения, внешний вид (а) и спектр излучения (б) которого представлен на рис. 20.5.


Рис. 20.5

(a) 1 - узел светодиода, 2 – накладная линза, 3 – блок питания, 4 – блок регулировки интенсивности свечения светодиода., (б) – Φ(λ) – нормированный спектр потока излучения светодиода.

В серийном микроспектрофотометре МСФУ-К (рис. 20.6) для подобной цели используется лампа накаливания КГМ9-70, которая в отличии от светодиода при регулировке интенсивности изменяет свой спектр излучения, что не допустимо для эталона.



Рис. 20.6

1 – принтер; 2 – источник питания галогенной лампы; 3 – система электропитания ртутной лампы; 4 – удлинитель; 5 – микроскопспектрофотометр; 6 – монитор; 7 – блок управления БУСМ-10

Таким образом, выполняя в составе АРМ роль системы сбора информации, оптический прибор является основным компонентом системы, обеспечивающим работу остальных составляющих АРМ телекамеры и вычислительного комплекса – компьютера.