

# Оптика. Квантовая природа излучения

## Глава 21

### Элементы геометрической и электронной оптики

#### § 165. Основные законы оптики. Полное отражение

Еще до установления природы света были известны следующие основные законы оптики: закон прямолинейного распространения света в оптически однородной среде; закон независимости световых пучков (справедлив только в линейной оптике); закон отражения света; закон преломления света.

**Закон прямолинейного распространения света:** свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

Доказательством этого закона является наличие тени с резкими границами от непрозрачных предметов при освещении их точечными источниками света (источники, размеры которых значительно меньше освещаемого предмета и расстояния до него). Тщательные эксперименты показали, однако, что этот закон нарушается, если свет проходит сквозь очень малые отверстия, причем отклонение от прямолинейности распространения тем больше, чем меньше отверстия.

**Закон независимости световых пучков:** эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены. Разбивая световой поток на отдельные световые пучки (например, с помощью диафрагм), можно показать, что действие выделенных световых пучков независимо.

Если свет падает на границу раздела двух сред (двух прозрачных веществ), то падающий луч  $I$  (рис. 229) разделяется на

два — отраженный  $II$  и преломленный  $III$ , направления которых задаются законами отражения и преломления.

**Закон отражения:** отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения; угол  $i'_1$  отражения равен углу  $i_1$  падения:

**Закон преломления:** луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела в точке падения, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред:

$$\sin i_1 / \sin i_2 = n_{21}, \quad (165.1)$$

где  $n_{21}$  — **относительный показатель преломления** второй среды относительно первой. Индексы в обозначениях углов  $i_1$ ,  $i'_1$ ,  $i_2$  указывают, в какой среде (первой или второй) идет луч.

Относительный показатель преломле-



Рис. 229

ния двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:

$$n_{21} = n_2/n_1. \quad (165.2)$$

**Абсолютным показателем преломления** среды называется величина  $n$ , равная отношению скорости  $c$  электромагнитных волн в вакууме к их фазовой скорости  $v$  в среде:

$$n = c/v. \quad (165.3)$$

Сравнение с формулой (162.3) дает, что  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ , где  $\epsilon$  и  $\mu$  — соответственно электрическая и магнитная проницаемости среды. Учитывая (165.2), закон преломления (165.1) можно записать в виде

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2. \quad (165.4)$$

Из симметрии выражения (165.4) вытекает обратимость световых лучей. Если обратить луч III (рис.229), заставив его падать на границу раздела под углом  $i_2$ , то преломленный луч в первой среде будет распространяться под углом  $i_1$ , т. е. пойдет в обратном направлении вдоль луча I.

Если свет распространяется из среды с большим показателем преломления  $n_1$  (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления  $n_2$  (оптически менее плотную) ( $n_1 > n_2$ ), например из стекла в воду, то, согласно (165.4),

$$\sin i_2 / \sin i_1 = n_1/n_2 > 1$$

и преломленный луч удаляется от нормали и угол преломления  $i_2$  больше, чем угол падения  $i_1$  (рис. 230, а). С увеличением угла падения увеличивается угол преломления (рис. 230, б, в) до тех пор, пока при некотором угле падения ( $i_1 = i_{\text{пр}}$ ) угол преломления не окажется равным  $\pi/2$ . Угол  $i_{\text{пр}}$  называется **предельным углом**. При углах падения  $i_1 > i_{\text{пр}}$  весь падающий свет полностью отражается (рис. 230, г).

По мере приближения угла падения к предельному интенсивность преломленного луча уменьшается, а отраженного — растет (рис.230, а—в). Если  $i_1 = i_{\text{пр}}$ , то интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего (рис. 230, г). Таким образом, при углах падения в пределах от  $i_{\text{пр}}$  до  $\pi/2$  луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы. Это явление называется **полным отражением**.

Предельный угол  $i_{\text{пр}}$  определим из формулы (165.4) при подстановке в нее  $i_2 = \pi/2$ . Тогда

$$\sin i_{\text{пр}} = n_2/n_1 = n_{21}. \quad (165.5)$$

Уравнение (165.5) удовлетворяет значениям угла  $i_{\text{пр}}$  при  $n_2 \leq n_1$ . Следовательно, явление полного отражения имеет место только при падении света *из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную*.

Явление полного отражения используется в призмах полного отражения. Показатель преломления стекла равен  $n \sim 1,5$ , поэтому предельный угол для границы стекло—воздух  $i_{\text{пр}} = \arcsin(1/1,5) = 42^\circ$ . Поэтому при падении света на границу стекло — воздух при  $i > 42^\circ$  всегда будет иметь место полное отражение. На рис.231, а—в показаны призмы полного отражения, позволяющие: а) повернуть луч на  $90^\circ$ ; б) повернуть изображение; в) обернуть лучи. Такие призмы применяются в оптических при-

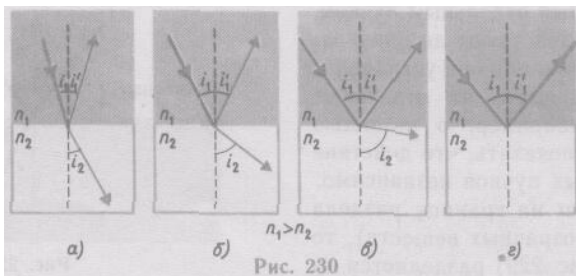


Рис. 230

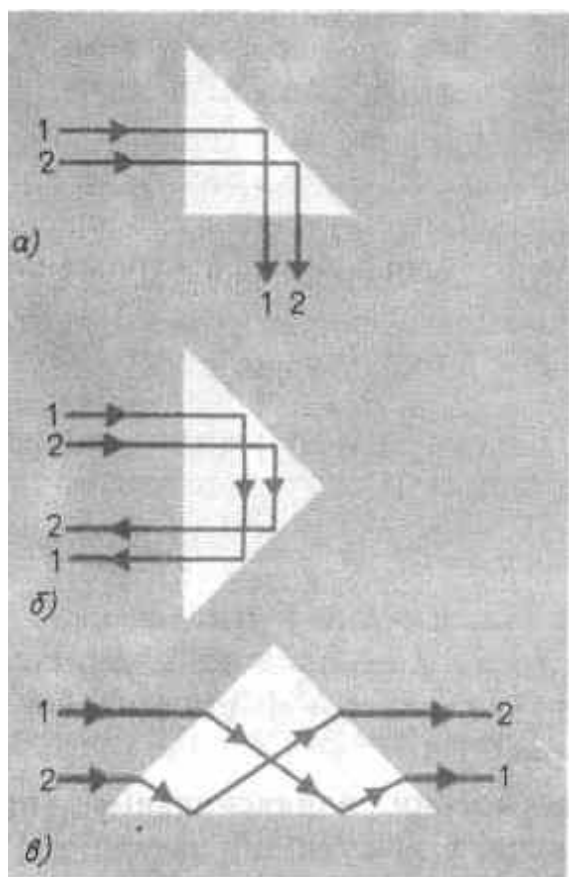


Рис. 231

а также в **рефрактометрах**, позволяющих определять показатели преломления тел (по закону преломления, измеряя  $i_{пр}$ , определяем относительный показатель преломления двух сред, а также абсолютный показатель преломления одной из сред, если показатель преломления второй среды известен).

Явление полного отражения используется также в **световодах (светопроводах)**, представляющих собой тонкие, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала. В волоконных деталях применяют стеклянное волокно, световедущая жила (сердцевина) которого окружается стеклом — оболочкой из другого стекла с меньшим показателем преломления. Свет, падающий на торец световода под углами, большими предельного, претерпевает на поверхности раздела сердцевинки и оболочки полное отражение и распространяется только по световедущей жиле.

Таким образом, с помощью световодов можно как угодно искривлять путь светового пучка. Диаметр световедущих жил лежит в пределах от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Для передачи изображений, как правило, применяются многожильные световоды. Вопросы передачи световых волн и изображений изучаются в специальном разделе оптики — **волоконной оптике**, возникшей в 50-е годы XX столетия. Световоды используются в электронно-лучевых трубках, в электронно-счетных машинах, для кодирования информации, в медицине (например, диагностика желудка), для целей интегральной оптики и т.д.

### § 166. Тонкие линзы. Изображение предметов с помощью линз

Раздел оптики, в котором законы распространения света рассматриваются на основе представления о световых лучах, называется **геометрической оптикой**. Под **световыми лучами** понимаются нормальные к волновым поверхностям линии, вдоль которых распространяется поток световой энергии. Геометрическая оптика, оставаясь приближенным методом построения изображений в оптических системах, позволяет разобрать основные явления, связанные с прохождением через них света, и является поэтому основой теории оптических приборов.

**Линзы** представляют собой прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями (одна из них обычно сферическая, иногда цилиндрическая, а вторая — сферическая или плоская), преломляющими световые лучи, способные формировать оптические изображения предметов. Материалом для линз служат стекло, кварц, кристаллы, пластмассы и т. п. По внешней форме (рис. 232) линзы делятся на: 1) двояковыпуклые; 2) плосковыпуклые; 3) двояковогнутые; 4) плосковогнутые; 5) выпукло-вогнутые; 6) вогнуто-выпуклые. По оптическим свойствам **линзы** делятся на **собирающие и рассеивающие**.

Линза называется **тонкой**, если ее толщина (расстояние между ограничивающими поверхностями) значительно меньше по сравнению с радиусами поверхностей, ограничивающих линзу. Прямая,

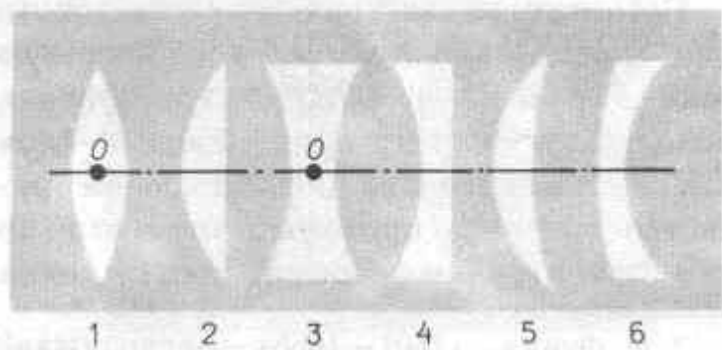


Рис. 232

264

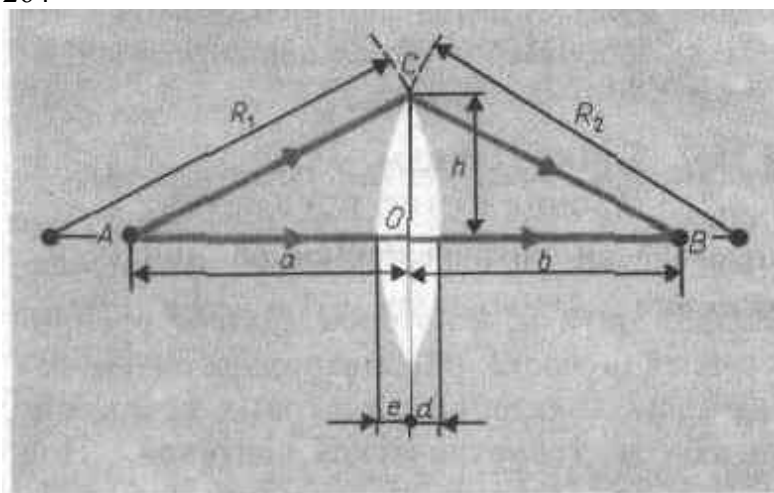


Рис. 233

Для всякой линзы существует точка, называемая **оптическим центром линзы**, лежащая на главной оптической оси и обладающая тем свойством, что лучи проходят сквозь нее не преломляясь. Для простоты оптический центр  $O$  линзы будем считать совпадающим с геометрическим центром средней части линзы (это справедливо только для двояковыпуклой и двояковогнутой линз с одинаковыми радиусами кривизны обеих поверхностей; для плосковыпуклых и плосковогнутых линз оптический центр  $O$  лежит на пересечении главной оптической оси со сферической поверхностью).

Для вывода формулы тонкой линзы — соотношения, связывающего радиусы кривизны  $R_1$  и  $R_2$  поверхностей линзы с расстояниями  $a$  и  $b$  от линзы до предмета и его изображения, — воспользуемся принципом **Ферма**, или принципом наименьшего времени: действительный путь рас-

пространения света (траектория светового луча) есть путь, для прохождения которого свету требуется минимальное время по сравнению с любым другим мыслимым путем между теми же точками.

Рассмотрим две траектории светового луча (рис. 233) — прямую, соединяющую точки  $A$  и  $B$  (луч ЛОВ), и траекторию, проходящую через край линзы (луч  $ACB$ ), — воспользовавшись условием равенства времени прохождения света по этим траекториям. Время прохождения света по траектории  $AOB$

$$t_1 = \frac{a + N(e + d) + b}{c},$$

где  $N = n/n_1$  — относительный показатель преломления ( $n$  и  $n_1$  — соответственно абсолютные показатели преломления линзы и окружающей среды). Время прохождения света по траектории  $ACB$  равно

$$t_2 = \frac{\sqrt{(a + e)^2 + h^2} + \sqrt{(b + d)^2 + h^2}}{c}.$$

Так как  $t_1 = t_2$ , то

$$\begin{aligned} a + N(e + d) + b &= \\ &= \sqrt{(a + e)^2 + h^2} + \sqrt{(b + d)^2 + h^2}. \end{aligned} \quad (166.1)$$

Рассмотрим **параксиальные (приосевые) лучи**, т. е. лучи, образующие с оптической осью малые углы. Только для параксиальных лучей получается **стигматическое изображение**, т. е. все лучи параксиального пучка, исходящего из точки  $A$ , пересекают оптическую ось в одной и той же точке  $B$ . Тогда  $h \ll (a + e)$ ,  $h \ll (b + d)$  и

$$\begin{aligned} \sqrt{(a + e)^2 + h^2} &= (a + e) \sqrt{1 + \frac{h^2}{(a + e)^2}} = \\ &= (a + e) \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a + e} \right)^2 \right] = \\ &= a + e + \frac{h^2}{2(a + e)}. \end{aligned}$$

Аналогично,

$$\sqrt{(b + d)^2 + h^2} = b + d + \frac{h^2}{2(b + d)}.$$

Подставив найденные выражения в (166.1), получим

$$(N - 1)(e + d) = \frac{h^2}{2} \left( \frac{1}{a + e} + \frac{1}{b + d} \right). \quad (166.2)$$

Для тонкой линзы  $e \ll a$  и  $d \ll b$ , поэтому (166.2) можно представить в виде

$$(N-1)(e+d) = \frac{h^2}{2} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right).$$

265

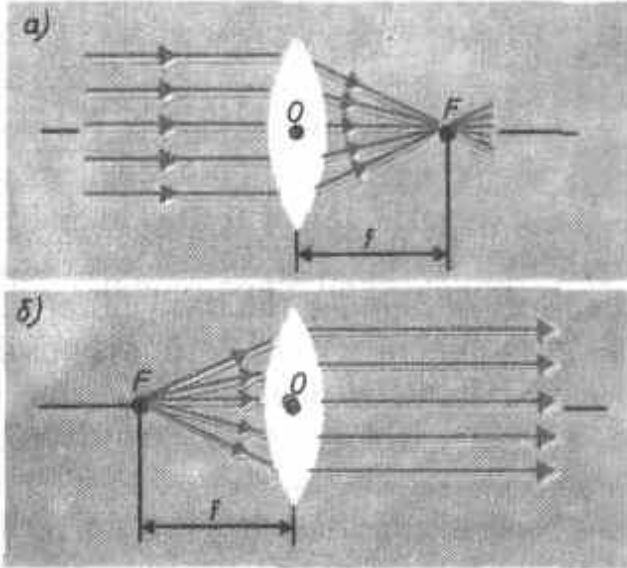


Рис. 234

Учитывая, что  $e = R_2 - \sqrt{R_2^2 - h^2} = R_2 - R_2 \sqrt{1 - h^2/R_2^2} = R_2 - R_2 [1 - 1/2(h/R_2)^2] = h^2/(2R_2)$  и соответственно

$$(N-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}. \quad (166.3)$$

Выражение (166.3) представляет собой **формулу тонкой линзы**. Радиус кривизны выпуклой поверхности линзы считается положительным, вогнутой — отрицательным. Если  $a = \infty$ , т.е. лучи

$$\frac{1}{b} = (N-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Соответствующее этому случаю расстояние  $b = OF = f$  называется **фокусным расстоянием линзы**:

$$f = \frac{1}{(N-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}.$$

Оно зависит от относительного показателя преломления и радиусов кривизны.

Если  $b = \infty$ , т.е. изображение находится в бесконечности и, следовательно, лучи выходят из линзы параллельным пучком (рис. 234, б), то  $a = OF = f$ . Таким образом, фокусные расстояния линзы, окруженной с обеих сторон одинаковой средой, равны. Точки  $F$ , лежащие по обе стороны линзы на расстоянии, равном фокусному, называются **фокусами линзы**. Фокус — это точка, в которой после преломления собираются все лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси. Величина

$$(N-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f} = \Phi \quad (166.4)$$

называется **оптической силой линзы**. Ее единица—диоптрия (дптр). **Диоптрия**— оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м: 1 дптр=1/м.

Линзы с **положительной** оптической силой являются **собирающими**, с **отрицательной** — **рассеивающими**. Плоскости, проходящие через фокусы линзы перпендикулярно ее главной оптической оси, называются **фокальными плоскостями**. В отличие от собирающей рассеивающая линза имеет мнимые фокусы. В мнимом фокусе сходятся (после преломления) воображаемые продолжения лучей, падающих на рассеивающую линзу параллельно главной оптической оси (рис.235).

Учитывая (166.4), формулу линзы (166.3) можно записать в виде

$$1/a+1/b=1/f$$

Для рассеивающей линзы расстояния  $f$  и  $b$  надо считать отрицательными.

Построение изображения предмета в линзах осуществляется с помощью следующих лучей:

- 1) луча, проходящего через оптический центр линзы и не изменяющего своего направления;
- 2) луча, идущего параллельно главной оптической оси; после преломления в линзе этот луч (или его продолжение) проходит через второй фокус линзы;
- 3) луча (или его продолжения), проходящего через первый фокус линзы; по-

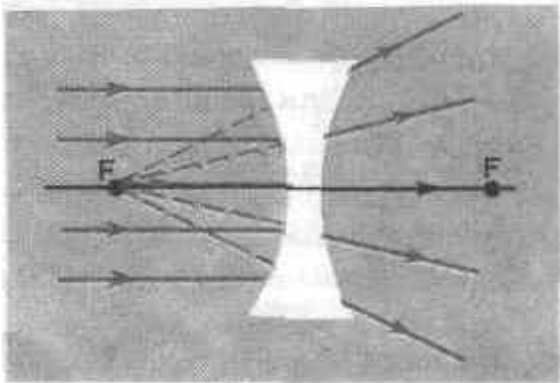


Рис. 235

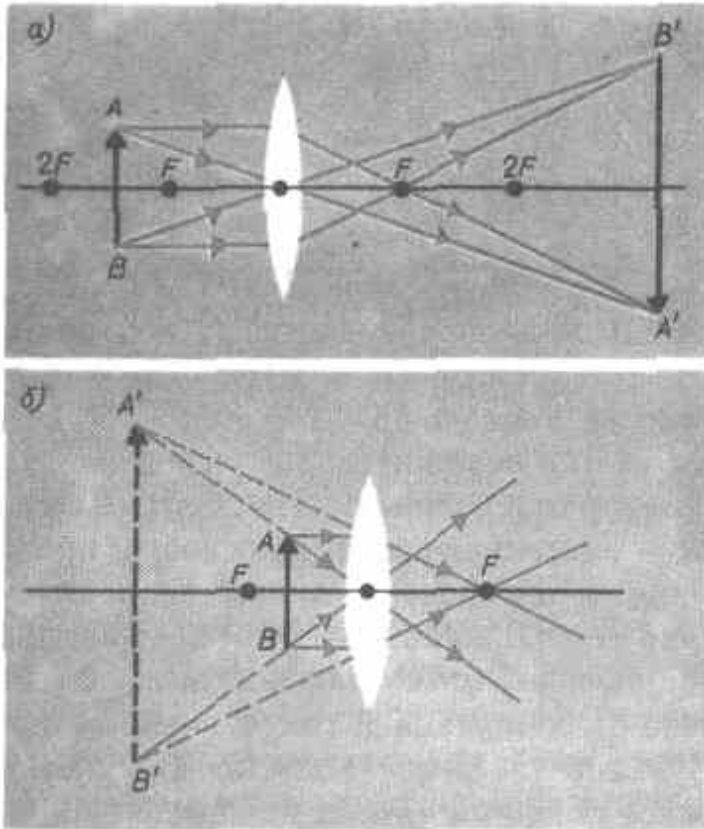


Рис. 236

сле преломления в ней он выходит из линзы параллельно ее главной оптической оси.

Для примера приведены построения изображений в собирающей (рис. 236) и в рассеивающей (рис. 237) линзах: действительное (рис. 236, а) и мнимое (рис. 236, б) изображения — в собирающей линзе, мнимое — в рассеивающей.

Отношение линейных размеров изображения и предмета называется **линейным увеличением линзы**. Отрицательным значениям линейного увеличения соответствует действительное изображение (оно перевернутое), положительным — мнимое изображение (оно прямое). Комбинации собирающих и рассеивающих линз применяются в оптических приборах, используемых для решения

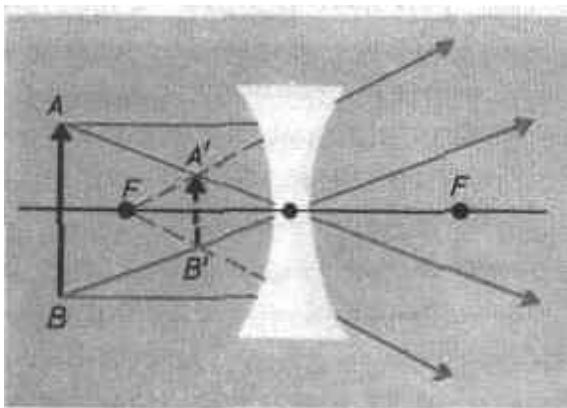


Рис. 237

### § 167. Аберрации (погрешности) оптических систем

Рассматривая прохождение света через тонкие линзы, мы ограничивались параксиальными лучами (см. § 166). Показатель преломления материала линзы считали не зависящим от длины волны падающего света, а падающий свет — монохроматическим. Так как в реальных оптических системах



эти условия не выполняются, то в них возникают искажения изображения, называемые **абберациями** (или **погрешностями**).

**1. Сферическая абберация.** Если расходящийся пучок света падает на линзу, то параксиальные лучи после преломления пересекаются в точке  $S'$  (на расстоянии  $OS'$  от оптического центра линзы), а лучи, более удаленные от оптической оси,— в точке  $S''$ , ближе к линзе (рис.238). В результате изображение светящейся точки на экране, перпендикулярном оптической оси, будет в виде расплывчатого пятна. Этот вид погрешности, связанный со сферичностью преломляющих поверхностей, называется сферической абберацией. Количественной мерой сферической абберации является отрезок  $\delta=OS''-OS'$ . Применяя диафрагмы (ограничиваясь параксиальными лучами), можно сферическую абберацию уменьшить, однако при этом уменьшается светосила линзы. Сферическую абберацию можно практически устранить, составляя системы из собирающих ( $\delta<0$ ) и рассеивающих ( $\delta>0$ ) линз. Сферическая абберация является частным случаем астигматизма.

**2. Кома.** Если через оптическую систему проходит широкий пучок от светящейся точки,

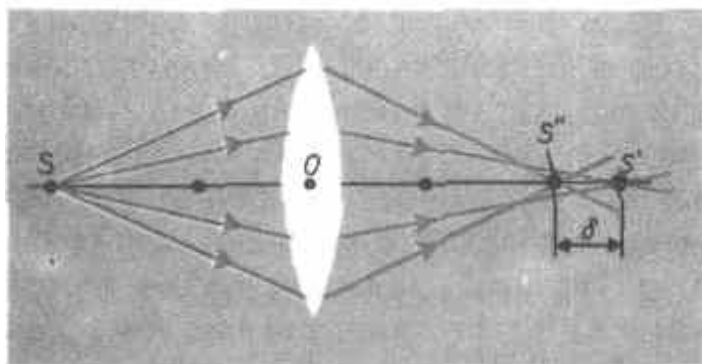
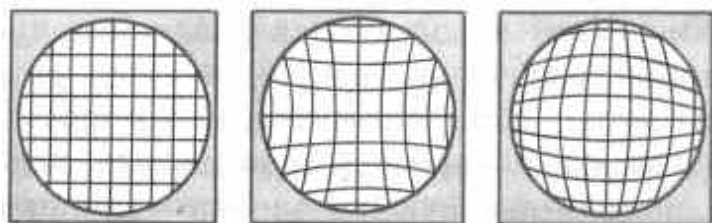


Рис. 238

267



а)

б)

в)

Рис. 239

оси, то получаемое изображение этой точки будет в виде освещенного пятнышка, напоминающего кометный хвост. Такая погрешность называется поэтому комой. Устранение комы производится теми же приемами, что и сферической абберации.

**3. Дисторсия.** Погрешность, при которой при больших углах падения лучей на линзу линейное увеличение для точек предмета, которые находятся на разных расстояниях от главной оптической оси, несколько различается, называется дисторсией. В результате нарушается геометрическое подобие между предметом (прямоугольная сетка, рис. 239, а) и его изображением (рис. 239, б — подушкообразная дисторсия, рис. 239, в — бочкообразная дисторсия). Дисторсия особенно опасна в тех случаях, когда оптические системы применяются для съемок, например при аэрофотосъемке, в микроскопии и т. д. Дисторсию исправляют соответствующим подбором составляющих частей оптической системы.

**4. Хроматическая aberrация.** До сих пор мы предполагали, что коэффициенты преломления оптической системы постоянны. Однако это утверждение справедливо лишь для освещения оптической системы монохроматическим светом ( $\lambda = \text{const}$ ); при сложном составе света необходимо учитывать зависимость коэффициента преломления вещества линзы (и окружающей среды, если это не воздух) от длины волны (явление дисперсии). При падении на оптическую систему белого света отдельные составляющие его монохроматические лучи фокусируются в разных точках (наибольшее фокусное расстояние имеют красные лучи, наименьшее — фиолетовые), поэтому изображение размыто и по краям окрашено. Это явление называется хроматической aberrацией. Так как разные сорта стекол обладают различной дисперсией, то, комбинируя собирающие и рассеивающие линзы из различных стекол, можно совместить фокусы двух (**ахроматы**) и трех (**апохроматы**) различных цветов, устранив тем самым хроматическую aberrацию. Системы, исправленные на сферическую и хроматическую aberrации, называются **апланатами**.

**5. Астигматизм.** Погрешность, обусловленная неодинаковостью кривизны оптической поверхности в разных плоскостях сечения падающего на ее светового пучка, называется астигматизмом. Так, изображение точки, удаленной от главной оптической оси, наблюдается на экране в виде расплывчатого пятна эллиптической формы. Это пятно в зависимости от расстояния экрана до оптического центра линзы вырождается либо в вертикальную, либо в горизонтальную прямую. Астигматизм исправляется подбором радиусов кривизны преломляющих поверхностей и их фокусных расстояний. Системы, исправленные на сферическую и хроматическую aberrации и астигматизм, называются **анастигматами**.

Устранение aberrаций возможно лишь подбором специально рассчитанных сложных оптических систем. Одновременное исправление всех погрешностей — задача крайне сложная, а иногда даже неразрешимая. Поэтому обычно устраняются полностью лишь те погрешности, которые в том или ином случае особенно вредны.

#### § 168. Основные фотометрические величины и их единицы

**Фотометрия** — раздел оптики, занимающийся вопросами измерения интенсивности света и его источников. В фотометрии используются следующие величины:

- 1) **энергетические** — характеризуют энергетические параметры оптического излучения безотносительно к его действию на приемники излучения;
- 2) **световые** — характеризуют физиологические действия света и оцениваются по воздействию на глаз (исходят из так называемой средней чувствительности глаза) или другие приемники излучения.

268

**1. Энергетические величины. Поток излучения  $\Phi_e$**  — величина, равная отношению энергии  $W$  излучения ко времени  $t$ , за которое излучение произошло:

$$\Phi_e = W/t.$$

Единица потока излучения — **ватт (Вт)**.

**Энергетическая светимость (излучательность)  $R_e$**  — величина, равная отношению потока излучения  $\Phi_e$ , испускаемого поверхностью, к площади  $S$  сечения, сквозь которое этот поток проходит:

$$R_e = \Phi_e/S,$$

т. е. представляет собой поверхностную плотность потока излучения.

Единица энергетической светимости — **ватт на метр в квадрате (Вт/м<sup>2</sup>)**.

**Энергетическая сила света (сила излучения)  $I_e$**  определяется с помощью понятия о точечном источнике света — источнике, размерами которого по сравнению с расстоянием до места наблюдения можно пренебречь. Энергетическая сила света  $I_e$  — величина, равная отношению потока излучения  $\Phi_e$  источника к телесному углу  $\omega$ , в пределах которого это излучение распространяется:

$$I_e = \Phi_e/\omega.$$

Единица энергетической силы света — **ватт на стерадиан (Вт/ср)**.

### Энергетическая яркость (лучистость)

$B_e$  — величина, равная отношению энергетической силы света  $\Delta I_e$  элемента излучающей поверхности к площади  $\Delta S$  проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения:

$$B_e = \Delta I_e / \Delta S.$$

Единица энергетической яркости — **ватт на стерадиан-метр в квадрате** (Вт/(ср•м<sup>2</sup>)).

**Энергетическая освещенность (облученность)**  $E_e$  характеризует величину потока излучения, падающего на единицу освещаемой поверхности. Единица энергетической освещенности совпадает с единицей энергетической светимости (Вт/м<sup>2</sup>).

### 2. Световые величины. При оптических

измерениях используются различные приемники излучения (например, глаз, фотоэлементы, фотоумножители), которые не обладают одинаковой чувствительностью к энергии различных длин волн, являясь, таким образом, **селективными (избирательными)**. Каждый приемник излучения характеризуется своей кривой чувствительности к свету различных длин волн. Поэтому световые измерения, являясь субъективными, отличаются от объективных, энергетических и для них вводятся световые единицы, используемые только для видимого света. *Основной световой единицей в СИ* является единица силы света — **кандела** (кд), определение которой дано выше (см. Введение). Определение световых единиц аналогично энергетическим.

**Световой поток**  $\Phi$  определяется как мощность оптического излучения по вызываемому им световому ощущению (по его действию на селективный приемник света с заданной спектральной чувствительностью).

Единица светового потока — **люмен** (лм): 1 лм — световой поток, испускаемый точечным источником силой света в 1 кд внутри телесного угла в 1 ср (при равномерности поля излучения внутри телесного угла) (1 лм = 1 кд•ср).

**Светимость**  $R$  определяется соотношением

$$R = \Phi / S.$$

Единица светимости — **люмен на метр в квадрате** (лм/м<sup>2</sup>).

**Яркость**  $B_\phi$  светящейся поверхности в некотором направлении  $\phi$  есть величина, равная отношению силы света  $I$  в этом направлении к площади  $S$  проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению:

$$B_\phi = I / (S \cos \phi).$$

Единица яркости — **кандела на метр в квадрате** (кд/м<sup>2</sup>).

**Освещенность**  $E$  — величина, равная отношению светового потока  $\Phi$ , падающего на поверхность, к площади  $S$  этой по-

269

верхности:

$$E = \Phi / S.$$

Единица освещенности — **люкс** (лк): 1 лк — освещенность поверхности, на 1 м<sup>2</sup> которой падает световой поток в 1 лм (1 лк = 1 лм/м<sup>2</sup>).

### § 169. Элементы электронной оптики

Область физики и техники, в которой изучаются вопросы формирования, фокусировки и отклонения пучков заряженных частиц и получения с их помощью изображений под действием электрических и магнитных полей в вакууме, называется **электронной оптикой**. Комбинируя различные электронно-оптические элементы — электронные линзы, зеркала, призмы, — получают электронно-оптические приборы, например электронно-лучевую трубку, электронный микроскоп, электронно-оптический преобразователь.

**1. Электронные линзы** представляют собой устройства, с помощью электрических и магнитных полей которых формируются и фокусируются пучки заряженных частиц. Существуют электростатические и магнитные линзы. В качестве **электростатической линзы** может быть использовано электрическое поле с вогнутыми и выпуклыми эквипотенциальными поверхностями,

например в системах металлических электродов и диафрагм, обладающих осевой симметрией. На рис. 240 изображена простейшая собирающая электростатическая линза, где  $A$  — точка предмета,  $B$  — ее изображение, пунктиром изображены линии напряженности поля.

**Магнитная линза** обычно представляет собой соленоид с сильным магнитным полем, коаксиальным

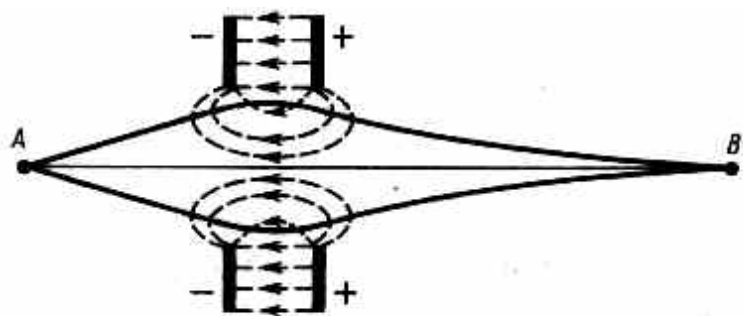


Рис. 240

бы магнитное поле сконцентрировать на оси симметрии, соленоид помещают в железный кожух с узким внутренним кольцевым разрезом.

Если расходящийся пучок заряженных частиц попадает в однородное магнитное поле, направленное вдоль оси пучка, то скорость каждой частицы можно разложить на два компонента: поперечный и продольный. Первый из них определяет равномерное движение по окружности в плоскости, перпендикулярной направлению поля (см. §115), второй — равномерное прямолинейное движение вдоль поля. Результирующее движение частицы будет происходить по спирали, ось которой совпадает с направлением поля. Для электронов, испускаемых под различными углами, нормальные составляющие скоростей будут различны, т. е. будут различны и радиусы описываемых ими спиралей. Однако отношение нормальных составляющих скорости к радиусам спиралей за период вращения (см. §115) будет для всех электронов одинаково; следовательно, через один оборот все электроны сфокусируются в одной и той же точке на оси магнитной линзы.

«Преломление» электростатических и магнитных линз зависит от их фокусных расстояний, которые определяются устройством линзы, скоростью электронов, разностью потенциалов, приложенной к электродам (электростатическая линза), и индукцией магнитного поля (магнитная линза). Изменяя разность потенциалов или регулируя ток в катушке, можно изменить фокусное расстояние линз. Стигматическое изображение предметов в электронных линзах получается только для параксиальных электронных пучков. Как и в оптических системах (см. § 167), в электронно-оптических элементах также имеют место погрешности: сферическая aberrация, кома, дисторсия, астигматизм. При разбросе скоростей электронов в пучке наблюдается также и хроматическая aberrация. Aberrации ухудшают разрешающую способность и качество изображения, а поэтому в каждом конкретном случае необходимо их устранять.

**2. Электронный микроскоп** — это устройство, предназначенное для получения изображения микрообъектов; в нем в отличие от оптического микроскопа вместо световых лучей используют уско-

270

ренные до больших энергий (30—100 кэВ и более) в условиях глубокого вакуума (примерно 0,1 мПа) электронные пучки, а вместо обычных линз — электронные линзы. В электронных микроскопах предметы рассматриваются либо в проходящем, либо в отраженном потоке электронов, поэтому различают **просвечивающие и отражательные электронные микроскопы**.

На рис. 241 приведена принципиальная схема просвечивающего электронного микроскопа. Электронный пучок, формируемый электронной пушкой 1, попадает в область действия **конденсорной линзы 2**, которая фокусирует на объекте 3 электронный пучок необходимого сечения и интенсивности. Пройдя объект и испытав в нем отклонения, электроны проходят вторую

магнитную линзу — **объектив 4** — и собираются ею в промежуточное изображение 5. Затем с помощью **проекционной линзы 6** на флуоресцирующем экране достигается окончательное изображение 7.

Разрешающая способность электронного микроскопа ограничивается, с одной стороны, волновыми

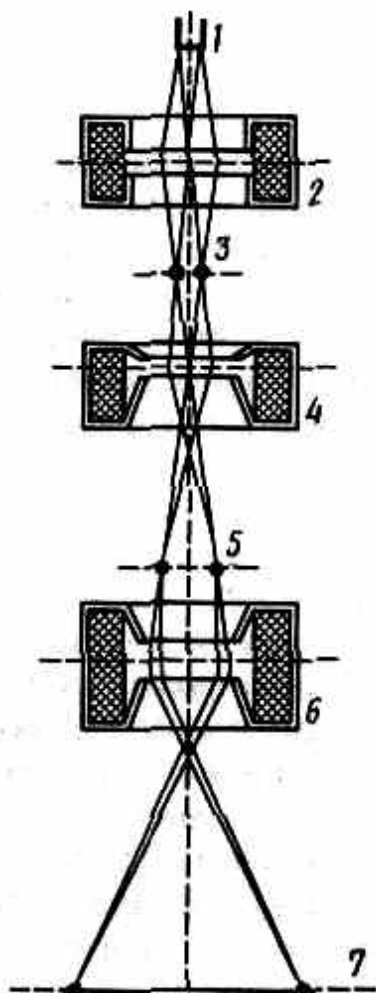
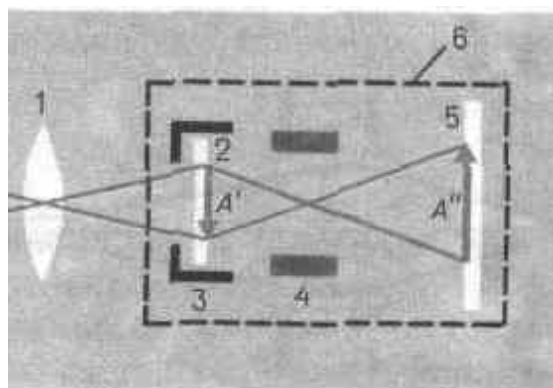


Рис. 241

Согласно теории, разрешающая способность микроскопа пропорциональна длине волны, а так как длина волны применяемых электронных пучков (примерно 1 пм) в тысячи раз меньше длины волны световых лучей, то разрешение электронных микроскопов соответственно больше и составляет 0,01 — 0,0001 мкм (для оптических микроскопов приблизительно равно 0,2—0,3 мкм). С помощью электронных микроскопов можно добиться значительно больших увеличений (до  $10^6$  раз), что позволяет наблюдать детали структур размерами 0,1 нм.

**3. Электронно-оптический преобразователь** — это устройство, предназначенное для усиления яркости светового изображения и преобразования невидимого глазом изображения объекта (например, в инфракрасных или ультрафиолетовых лучах) в видимое. Схема простейшего электронно-оптического преобразователя приведена на рис. 242. Изображение предмета *A* с помощью оптической линзы *1* проецируется на фотокатод *2*. Излучение от объекта вызывает с поверхности фотокатода фотоэлектронную эмиссию, пропорциональную распределению яркости спроецированного на него изображения. Фотоэлектроны, ускоренные электрическим полем (*3* — ускоряющий электрод), фокусируются с помощью электронной линзы *4* на флуоресцирующий экран *5*, где электронное изображение преобразуется в световое (получается окончательное изображение *A''*). Электронная часть преобразователя находится в высоковакуумном сосуде *6*.

Из оптики известно, что всякое увеличение изображения связано с уменьшением его освещенности. Достоинство электронно-оптических преобразователей заключается в том, что в них можно получить увеличенное изображение  $A''$  даже большей освещенности, чем сам предмет  $A$ , так как освещенность



• Рис. 242

Разрешающая способность каскадных (нескольких последовательно соединенных) электронно-оптических преобразователей составляет 25—60 штрихов на 1 мм. Коэффициент преобразования — отношение излучаемого экраном светового потока к потоку, падающему от объекта на фотокатод, — у каскадных электронно-оптических преобразователей достигает  $\sim 10^6$ . Недостаток этих приборов — малая разрешающая способность и довольно высокий темновой фон, что влияет на качество изображения.