

ортогональные к этим поверхностям лучи  $r(x, y, z)$ , имеет вид

$$(\text{grad}S)^2 = n^2(x, y, z).$$

Из этого уравнения получается соотношение для траектории светового луча:

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{dr}{ds} \right) = \text{grad}n(x, y, z). \quad (*)$$

Ур-ние (\*) допускает ряд частных решений, удовлетворяющих принципу «абсолютного прибора», т. е. оптич. системы, дающей стигматическое (резкое, без аберраций) изображение трёхмерного предмета.

Граданы. Простым примером абс. прибора можно считать сферич. граданы с распределением показателя преломления по радиусу  $n(r) = n_0 \sqrt{2 - (r/r_0)^2}$  — линза Луненберга и  $n(r) = n_0 / [1 + (r/a)^2]$  — «рыбий глаз» Максвелла. В первом случае неоднородная сфера собирает каждый падающий пучок параллельных лучей в единый фокус, во втором — отображение осуществляется преобразованием инверсии. Для аксиальной симметрии принципу абс. прибора удовлетворяет градан с распределением  $n(z)$ , зависящим от формы сферич. поверхности. Этот градан эквивалентен по аберрациям асферич. линзе. При радиальной симметрии принципу абс. прибора удовлетворяет распределение  $n(r) = \text{sech}(gr)$ . В этом случае неоднородная среда соответствует периодически фокусирующему волноводу с длиной периодичности  $L = 2\pi/g$ , где  $g = R^{-1} \sqrt{2\Delta n/n}$  — постоянная распространения,  $R$  — радиус волновода,  $\Delta n = n_0 - n(R)$  — перепад показателя преломления по сечению волновода. Радиальные граданы в виде цилиндрич. отрезка с таким распределением  $n$  эквивалентны линзе, свободной от аберраций, фазовых и амплитудных искажений. Варьируя длину отрезка, можно менять фокусное расстояние и получать в одном элементе объектив и оборачивающую систему.

Применение аксиальных и радиальных граданов в фокусирующей оптике с повышенными требованиями к качеству изображения (в объективах фотоаппаратов, микроскопов и др.) позволяет сократить в 2—4 раза или свести к минимуму число оптич. элементов. Граданы используются в качестве фокусирующих элементов лазерных систем видеозаписи. При этом пятно, формируемое и считываемое граданом, имеет размеры порядка длины волны света (0,6 мкм). Блок граданов используется в малогабаритных копировальных аппаратах.

Сельфоки. К числу радиальных граданов, имеющих широкое распространение, относятся безоболочечные световоды, получившие коммерч. название «сельфоки». Они способны самостоятельно формировать и транслировать изображение без дополнит. средств. В них все возбуждаемые моды имеют равные скорости распространения. В практически реализованных сельфоках на основе кварцевого стекла с параболич. распределением показателя преломления вида  $n(r) = n_0(1 - g^2r^2/2)$  [что соответствует первым двум членам разложения  $\text{sech}(gr)$ ] в диапазоне 1,26—1,32 мкм, где дисперсия стекла близка к нулю, скорость передачи информации на расстояние 1 км составляет 13,8 Гбит·км/с. Такие сельфоки, состоящие из одного световода, способны передавать изображение как целое с разрешающей способностью 500 лин/мм, с сохранением фазы, плоскости поляризации и малыми потерями (1 Дб/км). Длина сельфок достигает 1 км при diam. 100 мкм. Кроме применения для дальней оптич. связи, сельфоки используются как согласующие элементы, элементы жёстких эндоскопов, оптич. наконечники волоконно-оптич. фиброгастроскопов и др. Градиентные поверхностные слои применяются также вместо многослойных интерференционных просветляющих и отражающих покрытий.

Заданный градиент показателя преломления в граданах из стёкол получают под действием потока нейтронов ( $\Delta n = 0,02$ ) либо путём разл. модификаций ионного об-

мена, когда замена в матрице стёкол одних ионов на другие приводит к изменению её плотности и соответственно  $n$  ( $\Delta n = 0,04$ ). Граданы из полимеров получают в результате обмена мономеров в частично заполимеризов. матрице. Для них достигнуты максимальные  $\Delta n = 0,1$  при diam. 100 м. Возможно также получение граданов при направленном выращивании кристаллов с  $\Delta n = 0,04$  diam. до 20 мм. Кроме конденсиров. сред возможно использование в роли граданов газовых линз, возникающих при ламинарном течении газа через равномерно нагретые трубы. Градиентные среды возникают под действием мощного лазерного излучения и приводят к самофокусировке света.

На микронеоднородностях, показатели преломления  $k$ -рых отличаются от показателя преломления окружающей среды, происходит рассеяние света. Оптически неоднородными являются *мутные среды*; в них размеры оптич. неоднородностей обычно превышают длину световой волны  $\lambda$ . Если неоднородность среды вызвана присутствием в ней мелкодисперсных коллоидных частиц, размеры  $k$ -рых соизмеримы с  $\lambda$ , то среда кажется совершенно прозрачной; однако наблюдение под углом  $\approx 90^\circ$  к направлению падающего света обнаруживает свечение среды, обусловленное интенсивным рассеянием света (*Тиндалл эффект*). Существенную роль в О. н. с. играет интерференция света между рассеянными, отражёнными и преломлёнными световыми волнами, а также падающей волной.

К неоднородным средам относятся также вещества без иородных включений, в  $k$ -рых изменения  $n$  в большом числе микрообъёмов, приводящие к рассеянию света, вызваны флуктуациями плотности среды в результате хаотич. теплового движения её молекул или турбулентностью среды. Интенсивность  $I$  света, рассеиваемого непоглощающими диэлектрич. частицами, пропорциональна  $\lambda^{-2}$ , где  $p$  — параметр, зависящий от отношения размеров частиц к  $\lambda$ . При рассеянии света на тепловых флуктуациях, размеры  $k$ -рых много меньше  $\lambda$ ,  $I \sim \lambda^{-4}$  (Рэлей закон). Для частиц, размеры  $k$ -рых много больше  $\lambda$ , параметр  $p$  близок к нулю и рассеяние определяется геом. эффектами преломления света на поверхности раздела объёмов. В этом случае  $I$  не зависит от  $\lambda$ , что и наблюдается при рассеянии света в туманах и облаках — они имеют белый цвет. На изучении рассеяния света неоднородностями в газах, жидкостях и твёрдых телах основаны методы нефелометрии и ультрамикроскопии (см. *Ультрамикроскоп*), позволяющие определять концентрацию неоднородностей и изучать их природу (а в нефелометрии — и их размеры).

Особый раздел О. н. с. составляет *оптика тонких слоёв*.

Лит.: Борн М., Вольф Э., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973; Маркузе Д., Оптические волноводы, пер. с англ., М., 1974; Магнанд Е. В., Gradient index optics, N. Y., 1978; Ильин В. Г. и др., Оптика граданов, в кн.: Успехи научной фотографии, т. 23, М., 1985.

И. А. Диденко, Л. Н. Капорский.

**ОПТИКА ТОНКИХ СЛОЕВ** — раздел физ. оптики, в  $k$ -ром изучается прохождение света через один или последовательно через несколько непоглощающих слоёв вещества, толщина  $k$ -рых соизмерима с длиной световой волны. Специфика О. т. с. заключается в том, что в ней определяющую роль играет *интерференция света* между частично отражаемыми на верхних и нижних границах слоёв световыми волнами. В результате интерференции происходит усиление или ослабление проходящего или отражаемого света, причём эффект зависит от вносимой *оптической толщиной* слоёв разности хода лучей, длины волны (или набора длин волн) света, угла его падения и т. д. Тонкие слои могут быть образованы на массивной подложке из стекла, кварца или др. оптич. среды с помощью термич. испарения вещества и его осаждения на поверхность подложки, хим. осаждения, катодного распыления или хим. реакции материала подложки с выбранным веществом. Для получения таких слоёв используют разл. окислы:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1,59),  $\text{SiO}_2$  (1,46),