

ЗАОЧНАЯ ШКОЛА CARL ZEISS

С этого номера Редакция совместно с компанией ООО «Карл Цейсс» начинает новую рубрику «Заочная школа Carl Zeiss». В ней мы будем регулярно печатать учебные материалы из руководства «Handbook of Ophthalmic Optics», подготовленного компанией Carl Zeiss. В указанном руководстве в сжатом конспективном виде изложены практически все необходимые для работы врача-офтальмолога и оптика вопросы.

В последующих номерах журнала читателям будет предложено письменно ответить на несколько вопросов по «пройденному» материалу. Ответы следует высылать в ООО «Карл Цейсс» по указанному в конце статьи адресу. Читатели, активно участвующие в работе «Заочной школы», по окончании ее получают сертификат компании Carl Zeiss. «Заочная школа Carl Zeiss» будет публиковаться в течение 2005-2006 гг.

Руководство начинается с краткого экскурса в геометрическую и физическую оптику. Печатается с некоторыми сокращениями.

1. Геометрическая оптика

Отражение света

Закон отражения. Отраженный от поверхности луч света AR лежит в плоскости падающего на поверхность луча PA и нормали к ней LA (рис.1). Угол отражения i' равен углу падения i , но противоположен ему по знаку:

$$i = -i' \quad (1)$$

Угол отражения не зависит от длины волны света (т.е. от цвета).

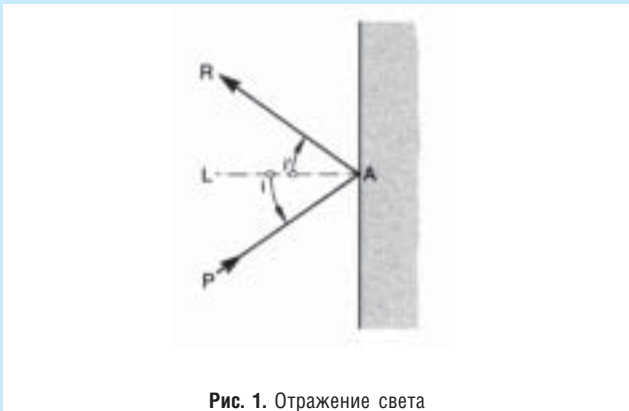


Рис. 1. Отражение света

Полное отражение. Полное внутреннее отражение может наблюдаться при падении луча на границу раздела двух сред с разными показателями преломления (n и n'). Если луч, идущий из оптически более плотной среды ($n > n'$), падает на границу раздела под углом, большим критического i_c , то он полностью отразится от нее (отражение без потерь) (рис.2). Значение критического угла определяется формулой:

$$\sin i_c = n'/n \quad (n' < n) \quad (2)$$

Для воздуха показатель преломления $n' = 1$ и в этом случае критический угол определяется формулой:

$$\sin i_c = 1/n.$$

Критический угол падения зависит от длины волны (цвета), так как n имеет разные значения для разных длин волн (см. ниже). Значения критического угла для некоторых материалов приведены в таблице 1 (вторая среда – воздух).

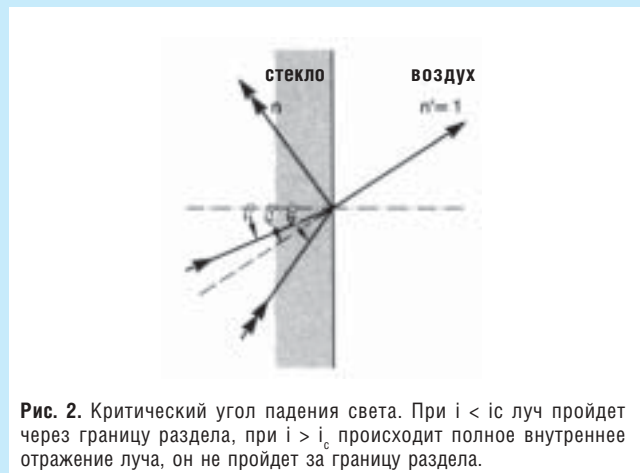


Рис. 2. Критический угол падения света. При $i < i_c$ луч пройдет через границу раздела, при $i > i_c$ происходит полное внутреннее отражение луча, он не пройдет за границу раздела.

Таблица 1. Значения критического угла падения света для разных материалов

Материал	n	i_c
вода	1.333	48.6°
кроновое стекло	1.518	41.2°
бариевое кроновое стекло	1.569	39.7°
флинт	1.613	38.3°
алмаз	2.417	24.5°

Преломление света

Показатель преломления

Показателем преломления материала называется отношение скорости света c_0 в вакууме к скорости света в этом материале c_n (или отношение соответствующих длин волн):

$$n = c_0 / c_n = \lambda_0 / \lambda_n \quad (3)$$

Согласно этому определению показатель преломления в вакууме для любой длины волны равен 1. Поскольку показатель преломления для воздуха очень близок к 1 (1,0003) при нормальных условиях (20° С, 1013 гПа), то в формуле (3) вместо значения c (λ) для вакуума обычно имеют в виду c (λ) для воздуха. В стекле, имеющем показатель преломления 1,5, свет имеет скорость, равную 2/3 от скорости света в воздухе, длина волны в стекле уменьшается в той же пропорции.

Закон преломления света

Луч света, наклонно падающий на границу раздела двух сред, отклоняется от своего первоначального направления (рис.3). Преломленный луч лежит в плоскости, образованной падающим лучом РА и нормалью к границе раздела LL'. Угол падения i и угол преломления i' связаны законом преломления Снелля:

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (4)$$

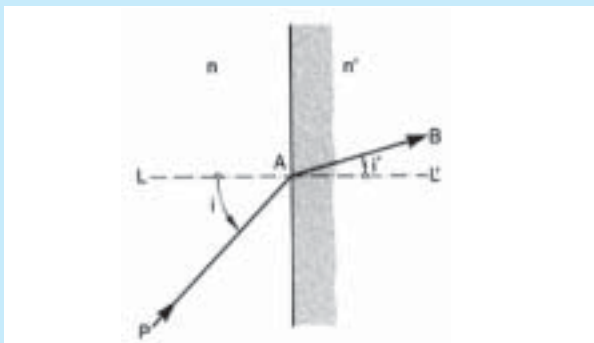


Рис. 3. Преломление света (n и n' – показатель преломления до границы раздела и после, соответственно)

Дисперсия

Показатель преломления зависит от длины световой волны (частоты, цвета). Это свойство приводит к расщеплению белого света на монохроматические компоненты при преломлении на границе раздела двух сред (этот эффект называется дисперсией). В связи с этим для характеристики рефракционной (преломляющей) способности оптически прозрачного материала (например, стекла) указывается значение n для определенной длины волны (спектральной линии).

Показатель преломления желтой спектральной линии (d) гелия (587,56 нм) известен как средний показатель преломления материала (n_d). Разница

значений показателя преломления для синей (линия F; 486,13 нм) и красной (линия C; 656,27 нм) спектральных линий водорода называется дисперсией:

$$\Delta n = n_F - n_C$$

Если берется разница значения n для других длин волн, то такие Δn называются парциальными дисперсиями. Важной величиной, используемой при рассмотрении хроматических aberrаций, является число Аббе (S) материала, определяемое отношением:

$$v = (n_d - 1) / (n_F - n_C) \quad (5)$$

На рис. 4 представлена зависимость показателя преломления от длины волны для некоторых материалов.

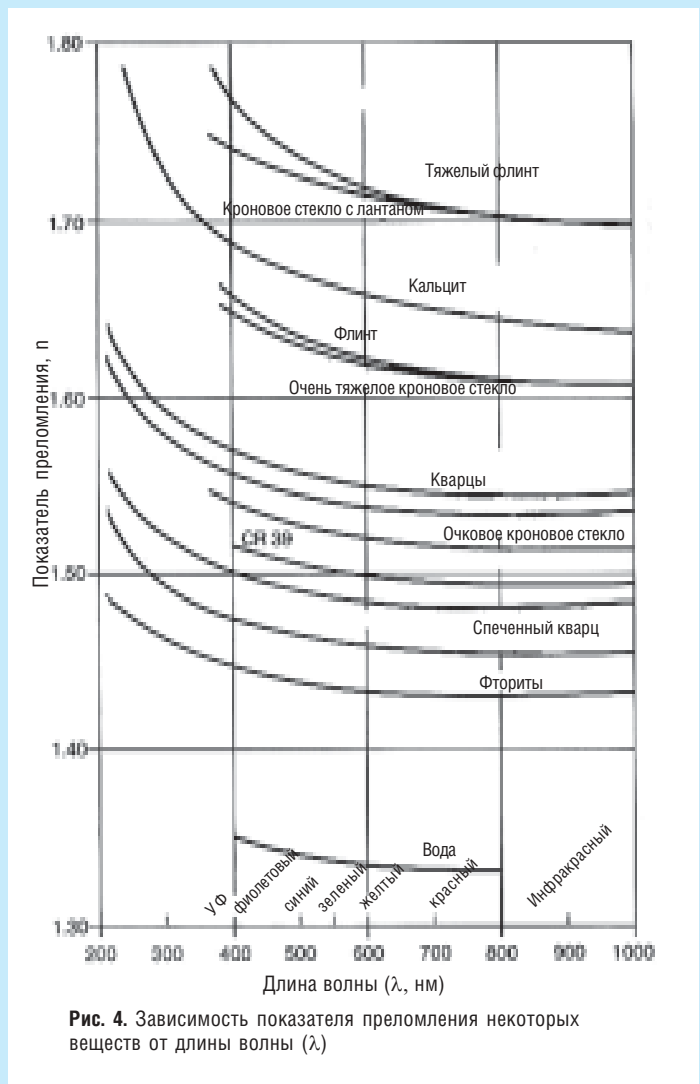


Рис. 4. Зависимость показателя преломления некоторых веществ от длины волны (λ)

Плоскопараллельная пластина

Если луч падает наклонно на плоскопараллельную стеклянную пластину, то он выйдет из пластины под тем же углом, что и вошел в нее (рис.5). Величина параллельного смещения луча (v) возрастает с:

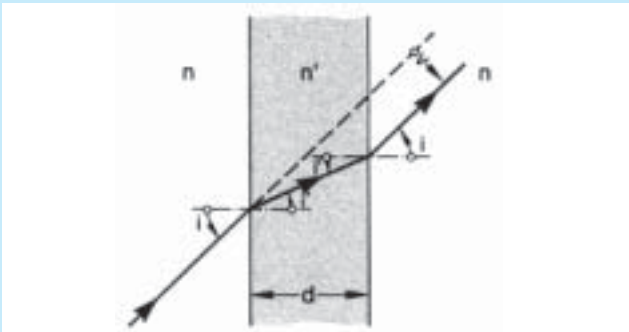


Рис. 5. Параллельное смещение луча плоскопараллельной пластиной ($n' > n$)

- 1) увеличением толщины пластины d
- 2) увеличением угла падения i
- 3) увеличением величины отношения показателя преломления материала пластины и окружающей среды n .

Величина параллельного смещения равна:

$$v = d \sin(i - i') / \cos i' \quad (6)$$

Если на пластину падает расходящийся пучок лучей, то расстояние (x) между точкой пересечения падающих на пластину лучей (точкой O) и точкой пересечения выходящих из пластины лучей (точкой O') (рис.6) равно:

$$x = d(1 - n/n') \quad (7)$$

Для пластины с $n' = 1,5$ и воздуха ($n = 1$) смещение составляет одну треть от толщины пластины. Если пластина изготовлена из материала, оптически более плотного, чем окружающая среда (как на рисунке), то x — положительная величина, если наоборот, то x будет со знаком «минус».

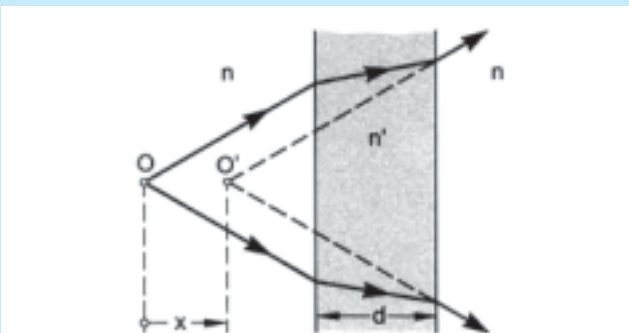


Рис. 6. Прохождение пучка лучей через плоскопараллельную пластину ($n' > n$)

Призма

Призма в оптически менее плотной среде отклоняет световой луч к основанию призмы. Угол отклонения (d) зависит от следующих параметров:

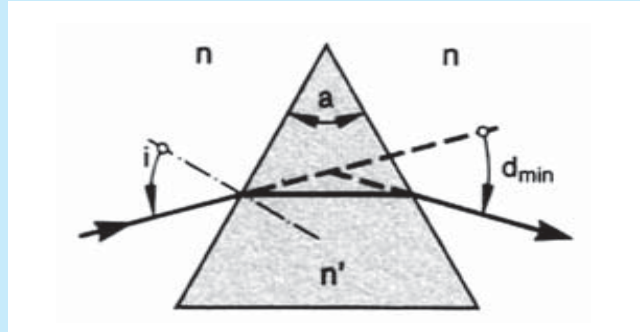


Рис. 7. Минимальное отклонение луча призмой ($n' > n$)

- 1) призмного угла (угла при вершине призмы)
- 2) угла падения i
- 3) отношения n материала призмы к n окружающей среды.

Угол отклонения будет минимальным, если луч проходит через призму симметрично (рис.7). При малых призмных углах и углах падения выполняется соотношение:

$$d = (n' - 1) a \quad (8)$$

Для призмы из материала с $n' = 1,5$ угол отклонения примерно равен половине призмного угла. В офтальмологии отклонение светового луча от его первоначального направления определяется в см/м (призмных диоптриях Δ). За отклонение в 1 см/м (1 Δ) принято смещение луча на 1 см на экране, расположенном на расстоянии 1 м от призмы перпендикулярно направлению падающего на призму луча.

Призматическое отклонение P (в см/м или Δ) и угол отклонения d связаны соотношением (рис.8):

$$P = 100 \text{ см/м} \tan d \quad (9)$$

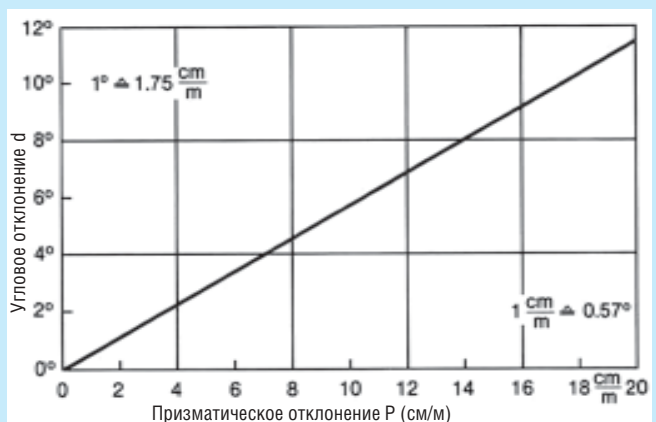


Рис. 8. Зависимость углового отклонения d от призматического P согласно формуле (9)

Для призмы, изготовленной из кронового стекла с $n = 1,525$, угол при вершине 1° приведет, согласно формулам (8) и (9), к отклонению луча в воздухе на $P = 0,916$ см/м.

Лучи разных цветов из-за эффекта дисперсии отклоняются призмой в разной степени. Белый свет, проходя через призму, разлагается на спектр; причем коротковолновые лучи (синие) преломляются сильнее длинноволновых (красные).

Линзы

Сферические линзы

Сферические линзы делятся на 2 группы:

- 1) линзы выпуклой формы (они в центре толще, чем по краю)
- 2) линзы вогнутой формы (они тоньше в центре, чем по краю)

На рис. 9 и 10 показаны основные формы выпуклых и вогнутых линз (у всех линз одинаковая оптическая сила).

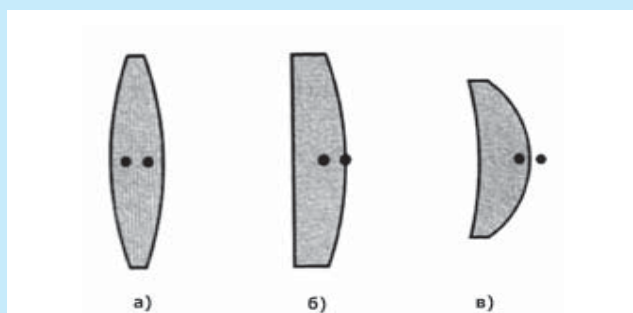


Рис.9. Выпуклые линзы: а) двояковыпуклая; б) плосковыпуклая; в) вогнуто-выпуклая (положительный мениск)

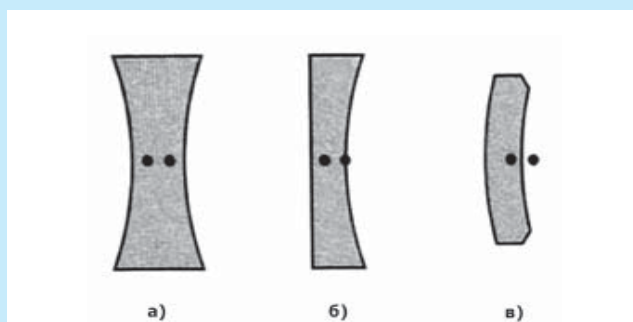


Рис.10. Вогнутые линзы: а) двояковогнутая; б) плосковогнутая; в) выпукло-вогнутая (отрицательный мениск)

Если сферические линзы находятся в оптически менее плотной среде, то линза выпуклой формы действует как собирающая линза (такие линзы называют также положительными или «плюсовыми»), а вогнутой формы — как рассеивающая линза (линзы называют также отрицательными или «минусовыми»).

Пучок параллельных лучей после прохождения через собирающую линзу становится сходящимся, а через рассеивающую — расходящимся. Оптической осью линзы называется линия, перпендикулярная обеим поверхностям линзы и проходящая через их центры кривизны. Точка пересечения оптической оси и поверхности линзы называется вершиной (вертексом) линзы. Любая поверхность, содержащая оптическую ось, называется меридианной плоскостью. У сферических линз одинаковы оптические характеристики во всех меридианных плоскостях.

Чтобы уменьшить aberrации, сферические линзы изготавливают с поверхностями, форма которых отлична от сферы, но при этом они остаются симметричными относительно оси вращения (асферические линзы).

Оптическая сила поверхности

Оптическая сила сферической поверхности с радиусом кривизны r , разделяющей среду с показателем преломления n (перед сферической поверхностью) и среду с показателем n' (позади сферической поверхности), равна:

$$F = (n' - n)/r \quad (10)$$

Единицей измерения оптической силы является диоптрия (D): $1 D = 1 / 1 \text{ м}$.

Если оптическая среда перед линзой с показателем преломления n_1' имеет показатель преломления n_1 , а у оптической среды позади линзы показатель преломления n_2' , то оптическая сила первой поверхности равна:

$$F_1 = (n_1' - n_1)/r_1 \quad (10),$$

а второй:

$$F_2 = (n_2' - n_1')/r_2 \quad (11).$$

Если посмотреть на сферическую поверхность раздела среда-линза со стороны менее оптически плотной среды, то выпуклая поверхность имеет положительную оптическую силу, а вогнутая — отрицательную.

Для измерения радиуса кривизны поверхности используется диоптриметр. Оптическую силу в диоптриях прибор показывает для определенного значения показателя преломления материала, из которого изготовлена линза (например, для материала $n' = 1,523$ и $n = 1$ для воздуха).

В следующем номере будет продолжено рассмотрение вопросов геометрической оптики (оптическая сила линзы, фокусное расстояние, астигматические линзы и др.)

Перевод — Минаев Ю.Л., «Вестник оптометрии»
Консультант — Дядина У.В., медицинский консультант компании ООО «Карл Цейсс»