

5.5. Отражение в тонких пленках

Интерференционные «узоры». Мы знаем по опыту, что любые достаточно тонкие пленки (мыльные пузыри, машинное масло и т. д.) переливаются яркими красками. Это явление возникает в результате интерференции света, отраженного от передней и задней поверхностей пленки. (То же может иметь место и в результате интерференции проходящего света.) В качестве примера рассмотрим тонкую пленку воздуха, заключенную между двумя предметными стеклами микроскопа. Размеры неровностей на поверхности предметного стекла микроскопа имеют порядок длины волны λ . Поэтому толщина воздушного зазора, образованного двумя прижатыми предметными стеклами, будет того же порядка. Если поверхности стекол прижаты так, что расстояние между поверхностями значительно меньше λ , то отражения от места соприкосновения не возникает в силу равенства $R_{21} = -R_{12}$. В тех местах переходного слоя, где толщина пленки равна $\frac{1}{2}\lambda$, суммарный путь для волны равен λ и отражения также не будет, так как разность фаз волн, отраженных от верхней и от нижней поверхностей пленки, равна $2\pi + \pi$. Максимумы в отраженном свете будут соответствовать отражениям от тех мест на поверхности пленки, толщина которых равна $\frac{1}{4}\lambda$, $\frac{3}{4}\lambda$, $\frac{5}{4}\lambda$ и т. д.

Пример 12. Домашний опыт. Почему первая кайма белая? Возьмем два чистых предметных стекла микроскопа. Притрем их друг к другу (не нажимая слишком сильно, чтобы не раздавить) и ориентируем относительно протяженного источника света (им может быть небо либо лампа накаливания в матовом баллоне) так, чтобы можно было наблюдать его отражение. Чтобы уменьшить влияние фона, расположим за пластинами черный экран. В отраженном свете вы увидите концентрические разноцветные кольца. Центральное пятно может быть черным. Это будет соответствовать отражению от соприкасающихся пластин. Первое кольцо после черного пятна имеет существенно белый цвет. Это происходит по следующей причине. Очевидно, что первый максимум в отраженном свете может возникнуть при отражении от пленки толщиной $\frac{1}{4}\lambda$. Мы знаем, что зеленый цвет ($\lambda \approx 5500 \text{ \AA} = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$) является центром видимого спектра. Поэтому толщина воздушной пленки, которая дает максимум для зеленого света в отраженном свете, равна $\frac{1}{4}(5,5) \times 10^{-5} = 1,37 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. С другой стороны, длина волны голубого света равна $\lambda \approx 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ и в пленке толщиной $1,37 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ уложится $0,30 \lambda$ волны голубого света. Аналогично для красного света ($\lambda \approx 6,5 \times 10^{-5} \text{ см}$) уложится $1,37/6,5 = 0,21 \lambda$. Таким образом, отражения для голубого и красного света на пленке толщиной примерно $1,37 \times 10^{-5} \text{ см}$ также будут давать максимум. Поэтому в сумме мы будем иметь белый свет.

Самая красивая кайма. (См. задачу 5.23.) Последовательность цветных каем с удалением от центра приобретает все более определенный цвет. Нас интересует, когда кайма будет ярко зеленого цвета,

т. е. какова должна быть толщина пленки, чтобы в отраженном свете был только зеленый свет. Мы знаем, что максимумы для волны зеленого света будут возникать при отражениях в пленке толщиной $(3/4)\lambda$, $(5/4)\lambda$, ..., $(N/4)\lambda$, где N нечетно. Если N таково, что для голубого света толщина равна $(N+1)(1/4)\lambda$ голубого света, а для красного $(N-1)(1/4)\lambda$ красного света, то отражение от этого места красного и голубого света даст минимум, и мы получим яркий зеленый свет. Каким должно быть N ?

Выражение для интенсивности каймы. Мы хотим получить выражение для интенсивности каймы данного цвета при отражении от тонкого слоя воздуха (или от стеклянной пластинки в воздухе) между двумя поверхностями стекла. Для этого мы воспользуемся результатами, полученными для смежных сред 1, 2 и 3 (см. рис. 5.5). В рассматриваемом случае среда 3 и среда 1 одинаковы, поэтому $R_{23} = R_{21} = -R_{12}$. Покажите сами (задача 5.24), что средняя во времени интенсивность отраженного света равна

$$\frac{I_{\text{отр}}}{I_0} = R_{12}^2 \sin^2 k_2 L. \quad (53)$$

Для перехода стекло — воздух или воздух — стекло $R_{12}^2 = 0,04$, и мы имеем

$$\frac{I_{\text{отр}}}{I_0} \approx 0,16 \sin^2 k_2 L. \quad (54)$$

Это выражение равно нулю для $L=0$ и для $L=1/2\lambda_2$ и имеет первый максимум при $L=1/4\lambda_2$. Заметим, что максимальная доля отраженной интенсивности равна 0,16, что в 4 раза больше интенсивности при однократном отражении от границы воздух — стекло.

Один плюс один равно четырем? Как нужно сложить равные интенсивности при отражении от двух поверхностей, чтобы получить интенсивность в 4 раза большую, чем каждая из них? Очевидно, сначала нужно найти суперпозицию волн, затем возвести ее в квадрат и найти среднюю по времени величину квадрата. В двух крайних случаях (каких?) мы можем получить либо $(1+1)^2=4$, либо $(1-1)^2=0$.

Заметим, что максимальная интенсивность цветной каймы, образованной отражением в воздушном слое между двумя предметными стеклами микроскопа, равна $0,16 I_0$. Интенсивность света, отраженного от каждой внешней поверхности, равна $0,04$. (Мы не видим интерференцию этих отражений, так как в ней участвует одновременно много длин волн и поэтому цвета, соответствующие этим волнам, полностью перемешиваются, давая в сумме белый цвет.)

Таким образом, интенсивность цветной каймы в два раза больше интенсивности окружающего света и ее легко наблюдать (особенно если вы положите под стекла темную материю, убрав фон).

Пример 13. Полосы Фабри — Перо в предметном стекле микроскопа. С помощью достаточно монохроматического источника

света легко наблюдать интерференционные полосы, вызванные суперпозицией отражений от обычного предметного стекла микроскопа или даже плоского оконного стекла.

Полное описание интерференционной картины в этом случае требует вычисления коэффициента отражения для нормально и косо падающих волн. Такие вычисления не представляют трудности, однако мы не будем ими заниматься. Мы рассмотрим только центральную полосу, соответствующую нормальному падению, и постараемся ответить на вопрос: насколько монохроматичным должен быть источник света? Ответ может быть получен из выражения (53).

Предположим, что $L=1 \text{ мм}=0,1 \text{ см}$. Если в свете присутствует только одно волновое число k_2 , то центральная полоса будет максимумом или минимумом в зависимости от того, равно ли значение $\sin^2 k_2 L$ единице или нулю. Если падающий свет представлен некоторым интервалом Δk , то в случае большого интервала для некоторых k будут получаться максимумы, а для некоторых минимумы и цвет полосы будет размыт. Насколько узким должен быть этот интервал волновых чисел Δk_2 , чтобы можно было получить отчетливо видную центральную полосу? (Можно допустить, что в случае косо падения побочные полосы будут различимы, если различима центральная полоса.) Максимумы в последовательности, определяемой выражением (54), отстоят друг от друга на интервал π по аргументу $k_2 L$. В первом приближении можно считать, что мы получим четкие полосы, если $(\Delta k_2) < \pi$. Исходя из этого, можно показать (задача 5.25), что необходимый диапазон обратных значений длины волны равен

$$\Delta(\lambda^{-1}) \approx 3,3 \text{ см}^{-1}, \quad (55)$$

т. е.

$$\Delta\nu = c\Delta(\lambda^{-1}) \approx 10^{11} \text{ гц}.$$

Например, для зеленой линии ($\lambda \approx 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$)

$$\Delta\lambda \approx 1,0 \text{ \AA}.$$

Таким образом, необходимый диапазон должен быть меньше, чем $3,3 \text{ см}^{-1}$. Мы покажем в главе 6, что диапазон $\Delta\nu \approx 10^9 \text{ гц}$ близок к естественной ширине линии для атома. Меньший диапазон частот можно получить только с помощью лазера. Таким образом, чтобы наблюдать четкие интерференционные полосы в оконном стекле, мы должны использовать источник из свободно излучающих атомов. Для этой цели может служить неоновая лампа (см. домашний опыт 5.10), а также пламя, в которое брошена щепотка соли или соды (см. домашний опыт 9.27).

Задачи и домашние опыты

5.1. Опыт. *Отражение от стекла.* Плоская стеклянная пластина отражает около 8% интенсивности света при нормальном падении, по 4% от каждой поверхности. Обычное зеркало, покрытое амальгамой ртути, отражает более 90% видимого света. Возьмите зеркало и чистый кусок стекла (например, предметное стекло микроскопа). Сравните отражение от зеркала и от стекла, расположив их рядом,