Брэгговское зеркало

Брэгговское зеркало (или распределенный диэлектрический отражатель) представляет собой набор ультратонких (от десятков до сотен нанометров) слоев из прозрачных материалов с периодически меняющимся показателем преломления n. Оптические толщины слоев подбираются таким образом, чтобы при падении света на такую структуру возникающая интерференция для отраженных от границ раздела сред лучей приводила бы к их взаимному усилению. В результате в определенном диапазоне длин волн такая многослойная структура начинает очень эффективно (с коэффициентом ~ 100%) отражать свет, несмотря на то, что каждый ее слой в отдельности прозрачен. Принцип такого распределенного отражателя широко используется, например, в одномерных фотонных кристаллах, интерференционных светофильтрах и т.п.

В простейшем случае Брэгговское зеркало состоит из последовательности двух чередующихся слоев с различными показателями преломления n_1 и n_2 (пусть для определенности $n_1 < n_2$). Известно, что при нормальном падении монохроматического света с длиной волны λ на такую многослойную структуру для достижения эффективного отражения необходимо выполнение следующего условия интерференционного максимума для отраженных лучей:

$$2\Lambda = m\lambda,$$

которое называется условием Брэгга (Λ – период структуры, m – целое число). При этом чаще всего оптические толщины каждого из слоев выбирают равными четверти длины волны падающего света (в условии Брэгга $m = 1$).

Вопрос №1: почему оптические толщины слоев простейшего Брэгговского зеркала выбирают равными именно $\lambda/_4$, и что изменится, если эти толщины выбрать в виде любой другой комбинации, дающей в сумме $\lambda/_2$? Ответ обосновать. (5 баллов)

Вопрос №2: как качественно изменится коэффициент отражения, если оптические толщины слоев взять равными $\lambda/_2$ (в условии Брэгга $m = 2$)? Ответ обосновать. (7 баллов)

Решение:

Для ответа на первый вопрос необходимо расписать условие интерференционного максимума для отраженных лучей более подробно, чем это дает условие Брэгга, а именно, учесть интерференцию при отражении от *каждой* из границ раздела, а не только от границ, определяющих период структуры (как в условии Брэгга). Без потери общности достаточно рассмотреть только одну пару слоев n_1/n_2, находящихся где-то внутри зеркала (за счет периодичности результат распространится и на всю структуру в целом). Пусть свет, прошедший очередной слой с показателем преломления n_2, падает нормально на границу раздела со слоем с показателем преломления n_1 и частично отражается от нее (отраженный луч №1), проходит далее до границы n_1/n_2 и снова претерпевает частичное отражение (отраженный луч №2), и, наконец, проходит полностью через слой с показателем преломления n_2 и отражается от границы со следующим слоем n_1 (отраженный луч №3). Обозначим толщину слоя с показателем преломления n_1 (n_2) как d_1 (d_2), соответственно. Тогда условие Брэгга, записанное фактически для интерференции лучей №1 и №3, будет иметь вид:

$$2(n_1 d_1 + n_2 d_2) = m\lambda$$

Оно, очевидно, выполняется при значении параметра $m = 1$, если оптические толщины слоев равны $n_1 d_1 = n_2 d_2 = {}^{\lambda}/_{4}$. Но, кроме того, интерференция возможна также и между лучами №1 и №2, равно как и между лучами №2 и №3. Соответствующие условия максимумов интерференции будут тогда иметь вид:

$$\begin{cases} 2n_1 d_1 + {}^{\lambda}/_{2} = m_1 \lambda \\ 2n_2 d_2 - {}^{\lambda}/_{2} = m_2 \lambda \end{cases} \qquad (*)$$

Здесь слагаемые $\pm{}^{\lambda}/_{2}$ отражают набег фазы равный π при отражении луча №2 от оптически более плотного слоя с показателем преломления n_2. И снова, очевидно, если $n_1 d_1 = n_2 d_2 = {}^{\lambda}/_{4}$, то равенства становятся верными при $m_1 = 1$ и $m_2 = 0$. Это означает, что в конструктивной (для отраженного света) интерференции участвуют не только лучи, отразившиеся от границ раздела, определяющих период структуры ($n_1 + n_2/n_1 + n_2$), но и от "внутренних" границ, разделяющих слои n_1/n_2. И, таким образом, результирующий эффект в этом случае максимален – отражение от такого зеркала на соответствующей длине волны будет полным (в случае идеальной структуры).

Если же теперь рассмотреть случай, когда $n_1 d_1 \neq n_2 d_2 \neq {}^{\lambda}/_{4}$, но при этом сохраняется условие $n_1 d_1 + n_2 d_2 = {}^{\lambda}/_{2}$, то, очевидно, условие Брэгга будет всё так же выполняться, а вот условия (*) – нет. Таким образом, конструктивная интерференция для последней структуры уже не будет такой эффективной, как в первом случае, и, следовательно, коэффициент отражения понизится (тем больше, чем больше разница между оптическими толщинами слоев).

Для ответа на второй вопрос в дополнение к условиям (*) следует записать условия минимумов интерференции в полном соответствие с вышеприведенными рассуждениями об отраженных лучах №1, №2 и №3. Получаем систему:

$$\begin{cases} 2n_1 d_1 + {}^{\lambda}/_{2} = (2k_1 + 1)\dfrac{\lambda}{2} \\ 2n_2 d_2 - {}^{\lambda}/_{2} = (2k_2 + 1)\dfrac{\lambda}{2} \end{cases}$$

Очевидно, что в случае $n_1 d_1 = n_2 d_2 = {}^{\lambda}/_{4}$ эти равенства не выполнялись ни при каких целых значениях k_1 и k_2. Однако, при $n_1 d_1 = n_2 d_2 = {}^{\lambda}/_{2}$ условия уже становятся верными при $k_1 = 1$ и $k_2 = 0$. Это означает, что будет наблюдаться взаимное гашение лучей №1 и №2, равно как и лучей №2 и №3. Следовательно, несмотря на то, что в случае $n_1 d_1 = n_2 d_2 = {}^{\lambda}/_{2}$ формально условие Брэгга о максимуме в интерференции отраженных лучей №1 и №3 выполняется при $m = 2$, реально сами эти лучи оказываются уже погашены за счет "внутренней" деструктивной (по отношению к отраженному свету) интерференции. Таким образом, в случае, если оптические толщины слоев взять равными ${}^{\lambda}/_{2}$, вместо полного отражения от такой структуры будет наблюдаться, наоборот, полное пропускание (для идеально прозрачных слоев): "Брэгговское зеркало" не будет зеркалом как таковым.