

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

535.416(023)

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ \*)****Ф. Бомейстер, Дж. Пинкус**

*Оптические явления, ответственные за радужную окраску различных природных материалов, в том числе и перьев павлиньего хвоста, используются для создания ряда современных оптических деталей.*

Что общего между масляными пятнами, мыльными пленками, раковинами устриц и павлиньим хвостом? Хорошо известная природная радужная окраска всех этих поверхностей представляет собой проявление одного и того же явления, а именно — интерференции света в тонких пленках. Несмотря на то, что принципы оптической интерференции были выяснены более ста лет назад, только в последние десятилетия эти знания стали использовать для практических целей. Наиболее старым и простым применением интерференции в тонких пленках, остающимся, однако, наиболее распространенным и в наши дни, является однослойное просветляющее покрытие, которое используется для уменьшения отражения света от поверхностей объективов различных оптических приборов.

В последние годы были разработаны более сложные оптические интерференционные покрытия, состоящие из большого числа тонких пленок различных материалов, последовательно наносимых на оптическую поверхность. Такие многослойные покрытия используются не только в качестве просветляющих слоев, но также как светофильтры, поляризаторы, разделители световых пучков и зеркала с большим коэффициентом отражения. Они являются неотъемлемой частью таких современных оптических систем, как лазеры, цветные телевизионные камеры и инфракрасные системы управления полетом ракет и снарядов. Эта статья посвящена описанию основных принципов интерференции света и детальному обсуждению оптических устройств, в которых используется это явление.

Явление интерференции в тонких пленках можно объяснить на основе волновой теории света. Если световая волна, распространяющаяся в в какой-либо среде (например, в воздухе), встречает на своем пути среду с другим показателем преломления (например, стекло), то часть энергии падающей световой волны отражается на границе раздела этих сред (рис. 1). Амплитуду отраженной световой волны, которая эквивалентна

---

\*) Ph. Baumeister, G. Pincus, Optical Interference Coatings, Scientific American 223 (6), 58 (1970). Перевод О. А. Шустина.

Филип Бомейстер является профессором Института оптики при Рочестерском университете, США, Джеральд Пинкус — руководитель отдела оптических покрытий фирмы «Boxton Veel, Inc.», Нью-Йорк (США).

напряженности электрического поля в этой волне, можно рассчитать при помощи формулы, установленной в 1823 г. французским физиком О. Френелем. Эта формула дает так называемый *амплитудный коэффициент отражения*, который зависит от отношения показателей преломления двух сред; в случае границы раздела воздух — стекло амплитуда отраженной волны составляет 0,203 (или около 20%) от амплитуды падающей волны \*).

Глаз человека и большинство других приемников света реагируют не на амплитуду световой волны, а на ее интенсивность, которая равна квадрату амплитуды; таким образом интенсивность отраженной волны

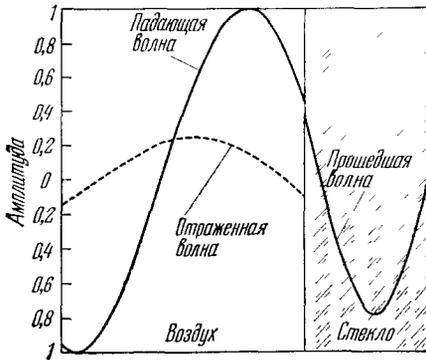


Рис. 1. Свободная от покрытия стеклянная поверхность отражает часть световой энергии падающей на нее волны. Амплитуда отраженной волны, которая эквивалентна напряженности электрического поля в этой волне, зависит от отношения показателей преломления двух сред (воздуха и стекла); в рассматриваемом случае она составляет 0,203 (или около 20%) от амплитуды падающей световой волны. Преломленная сквозь границу раздела волна имеет в стекле меньшую длину волны, чем падающая, так как скорость распространения света в стекле меньше, чем в воздухе.

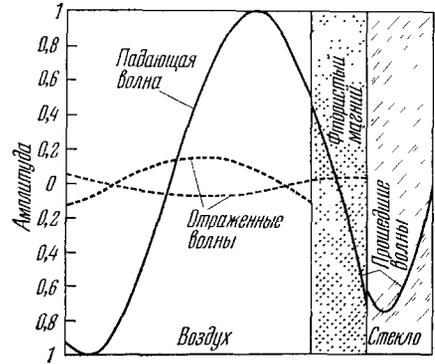


Рис. 2. Стеклянная пластинка покрыта просветляющей пленкой фтористого магния, оптическая толщина которой равна одной четверти длины волны падающего света.

Отражение уменьшается потому, что обе отраженные волны находятся в противофазе. Амплитуда волны, отраженной от поверхности, которой является граница раздела воздух — пленка, равна 0,16, а отраженной от границы раздела пленка — стекло — 0,048. Таким образом, результирующая амплитуда отраженной волны равна 0,16—0,048 или приблизительно 0,11, что составляет 11% амплитуды падающей световой волны.

в предыдущем примере равна  $(0,203)^2$ , или 4,1% интенсивности падающей волны. Это — обычное отражение, которое имеет место на каждой поверхности куска оконного стекла.

Предположим теперь, что мы хотим уменьшить отражение, нанося на поверхность стекла просветляющее покрытие, представляющее собой, например, тонкую пленку фтористого магния (рис. 2). Тогда падающая световая волна будет частично отражаться на обеих поверхностях просветляющей пленки. Между двумя отраженными волнами будет существовать определенная разность фаз, так как для световой волны, испытавшей отражение на границе пленка — стекло, требуется определенное время на прохождение пленки туда и обратно. Эта разность фаз зависит от толщины пленки (выраженной в долях длины волны падающего света), а также от ее показателя преломления. Удобно выражать разность фаз двух отраженных волн через *оптическую толщину* пленки, которая является произведением ее геометрической толщины на показатель преломления пленки.

\*) Здесь и ниже автор имеет в виду значения коэффициентов отражения при нормальном падении света на отражающие поверхности. (Прим. перев.)

Если оптическая толщина пленки равна одной четверти длины волны, разность фаз между двумя отраженными волнами будет составлять  $180^\circ$ ; другими словами, эти волны будут находиться в противофазе. Это означает, что результирующая амплитуда отраженной волны будет иметь минимальное значение, так как две складывающиеся волны частично гасят друг друга. Амплитуды волн, отраженных от границ воздух — пленка и пленка — стекло, составляют соответственно 0,16 и 0,048 от амплитуды падающей световой волны. Результирующая амплитуда отраженной волны равна разности амплитуд отдельных волн, т. е. приблизительно 0,11, и соответственно интенсивность отраженной волны будет равна  $(0,11)^2 = 0,012$ , или 1,2% интенсивности падающей волны.

Минимум отражения достигается только для одной определенной длины волны. Для длин волн более коротких, чем длина волны, соответствующая минимуму отражения, интенсивность отраженной волны будет возрастать до тех пор, пока оптическая толщина пленки не достигнет половины длины волны. В этом случае разность фаз между отраженными волнами будет равна  $360^\circ$  и, таким образом, амплитуды волн, отраженных от обеих поверхностей пленки, будут складываться в фазе и давать максимум амплитуды суммарной отраженной волны. Результирующая амплитуда отраженной волны будет равна сумме амплитуд отдельных волн, т. е. будет составлять 0,208. Для других длин волн амплитуда отраженной волны будет иметь значение, лежащее между максимальной и минимальной величинами.

Длина волны, для которой наблюдается минимум отражения, зависит от толщины просветляющей пленки. Например, если оптическая толщина пленки равна одной четверти длины волны для зеленой области спектра, то отражение будет минимальным именно в этой области. Такое покрытие наносится на объективы, применяемые для фотографирования на черно-белую пленку, и в отраженном свете оно имеет пурпурный оттенок. Если же объектив используется для цветной фотографии, то пленка фтористого магния имеет несколько меньшую толщину и минимум отражения лежит в голубой области спектра. Такое покрытие в отраженном свете имеет янтарный оттенок.

Однослойное покрытие из фтористого магния уменьшает интенсивность отраженного света до малой величины, но не до нуля. Величина минимальной интенсивности зависит от показателей преломления покрытия и стекла, на которое покрытие нанесено. Если показатель преломления пленки равен корню квадратному из показателя преломления стекла, то световые волны, отраженные от обеих поверхностей пленки, имеют одинаковую амплитуду и в результате интерференции они полностью гасят друг друга. Таким образом, необходимо, чтобы показатель преломления пленки был равен  $(1,51)^{1/2}$ , или 1,23. К сожалению, невозможно изготовить прочную пленку с таким малым показателем преломления, и пленки из фтористого магния дают только частичное решение задачи: они имеют сравнительно низкий показатель преломления (1,38) и обладают достаточной прочностью.

Выше обсуждалась только отражательная способность покрытия. Чем же определяется его пропускание? Существуют уравнения, позволяющие рассчитать интенсивность прошедшей волны. Однако если считать покрытие непоглощающим, то интенсивности отраженной и прошедшей волн должны в сумме составлять 100% интенсивности падающей волны. Это следует из закона сохранения энергии. Например, для описанного выше покрытия интенсивность отраженной волны равна 1,2%. Так как поглощение в пленке пренебрежимо мало, интенсивность прошедшей волны будет равна  $100\% - 1,2\% = 98,8\%$ .

Метод расчета отражательной способности покрытия, основанный на суммировании амплитуд световых волн, отраженных от каждой поверхности покрытия, называется *методом векторного сложения амплитуд*. Выше этот метод был использован для расчета отражательной способности однослойного покрытия. Однако он может быть применен также для двух и более слоев. Преимущество этого метода состоит в том, что он просто и наглядно объясняет принцип действия просветляющего покрытия. К его недостаткам надо отнести то обстоятельство, что по мере увеличения числа слоев и разностей их показателей преломления точность метода становится все хуже. Насколько же хорошо приближение, даваемое этим методом, в случае покрытия из фтористого магния? Точность метода в этом случае можно оценить, если исходить из того, что при оптической толщине покрытия, равной половине длины волны, интенсивность отраженной волны должна быть, как показывает точный расчет, такой же, как от чистого стекла. Метод векторного сложения амплитуд дает в этом случае отражательную способность  $(0,208)^2$ , или 4,3%, а точный расчет 4,1%.

Промышленное производство оптических интерференционных покрытий начало развиваться только после 1930 г., когда появились хорошие вакуумные насосы и материалы, позволявшие наносить пленки испарением в вакууме. Основная трудность состояла в том, что напыляемая пленка должна была иметь постоянную толщину по всей площади покрытия, а размер покрываемой детали в некоторых случаях достигал нескольких метров. Кроме того, пленка должна быть достаточно твердой и прочной, и ее толщина должна контролироваться с точностью не хуже 5%. Хотя такие пленки можно получать методом химического осаждения или при помощи катодного распыления, метод напыления в вакууме имеет наиболее широкое распространение.

Установка для напыления в вакууме состоит из металлического колокола, под которым создается вакуум, стойки для крепления подложки, на которую будет наноситься пленка, и электрически подогреваемого источника паров напыляемого материала. Кроме того, над подложкой располагается нагреватель для ее прогрева в процессе напыления. Под вакуумной камерой находится масляный диффузионный насос и механический насос, удаляющие воздух из камеры.

Проследим, как производится напыление пленки фтористого магния на поверхность линзы. Прежде всего линзы моют, чтобы удалить жир и грязь с их поверхностей. Затем помещают на стойке под колоколом в обойме, содержащей обычно около 40 линз. Насосы откачивают воздух из вакуумной камеры до давления ниже чем  $1/7$  600 000 от атмосферного давления. Такое давление равно 100 *мктор*. После удаления воздуха из камеры включается нагреватель, который к моменту напыления нагревает линзы до 150 °С. Напыление на горячую подложку позволяет получать очень прочное покрытие.

В зависимости от мощности насосов, но обычно через 10 *мин* после начала откачки давление в камере достигает значения 100 *мктор*. После этого оператор включает нагрев источника, и при достижении соответствующей температуры начинается испарение фтористого магния. При таком давлении средняя длина свободного пробега молекул больше размеров вакуумной камеры. Это означает, что большая часть молекул пара, вылетевших из источника, достигает подложки, не испытывая столкновений с другими молекулами, присутствующими в камере. Когда эти молекулы попадают на подложку, некоторые из них прилипают к ней и конденсируются (т. е. из пара сразу образуется твердая пленка). Через некоторое время пленка твердого фтористого магния покрывает всю поверхность,

и оператор может судить о ее толщине по цвету отраженного от пленки света. Напыление продолжается до тех пор, пока толщина пленки не достигнет нужной величины. После этого выключают подогрев источника распыляемого вещества. Затем впускают воздух под вакуумный колокол и вынимают напыленные линзы. Если они должны быть покрыты просветляющей пленкой с обеих сторон, то переворачивают ободку с линзами, и процесс напыления повторяется.

Промышленные установки такого типа для получения просветляющих покрытий были разработаны в начале 40-х годов, и очень скоро преимущества просветленной оптики стали очевидны. Однослойные просветляющие

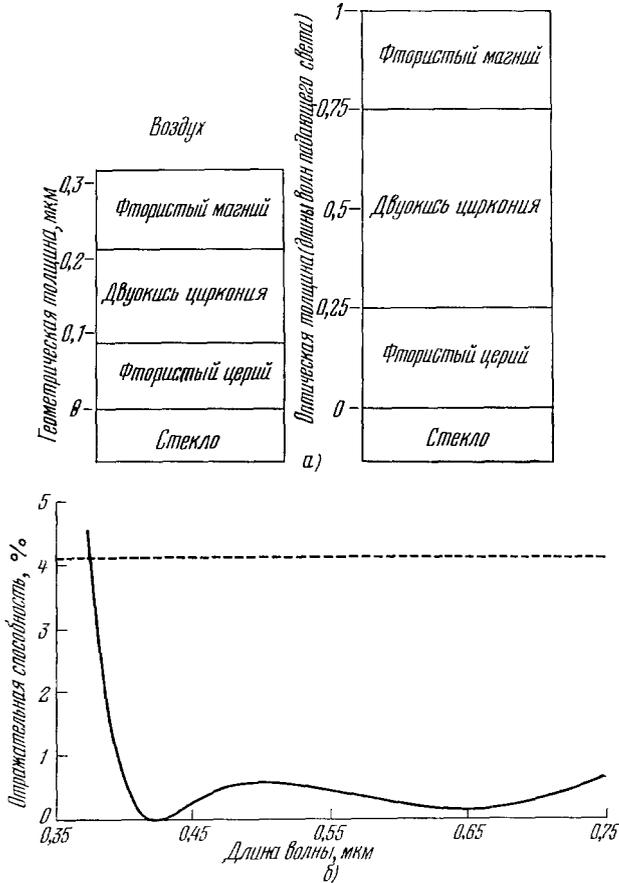


Рис. 3. Трехслойное просветляющее покрытие.

На рис. а) изображена схема такого покрытия. Толщина слоев отсчитывается в единицах геометрической толщины (в *мкм*) и в единицах оптической толщины (в длинах волн падающего света). Оптическая толщина покрытия является произведением его геометрической толщины на показатель преломления материала, из которого изготовлено покрытие. Начиная от поверхности стекла, первый слой состоит из фтористого магния, оптическая толщина которого равна одной четверти длины волны и показатель преломления 1,63. Второй слой представляет собой пленку двуокиси циркония оптической толщиной в половину длины волны и с показателем преломления 2,1. Верхний слой изготовлен из фтористого церия с показателем преломления 1,38 и имеет оптическую толщину в четверть длины волны. Как следует из графика, изображенного на рис. б), отражательная способность стекла, покрытого трехслойным покрытием (сплошная кривая), значительно меньше отражательной способности чистого стекла (штриховая) во всей видимой области спектра.

покрытия эффективны и дешевы в производстве и поэтому до сих пор имеют широкое распространение.

В начале 60-х годов начались интенсивные разработки другого типа просветляющих покрытий, а именно — трехслойных покрытий (рис. 3).

Несмотря на то, что теория таких покрытий была известна в 40-х годах, в то время не была еще разработана техника получения пленок с нужным показателем преломления. В покрытиях такого рода на стекло наносится пленка с показателем преломления 1,63, оптическая толщина которой равна четверти длины волны. На нее напыляется пленка с оптической толщиной в половину длины волны и с показателем преломления 2,1. С воздухом граничит пленка из фтористого магния, имеющая оптическую толщину в четверть длины волны и показатель преломления 1,38. Отражательная способность такого покрытия ниже, чем у однослойного покрытия, почти во всей видимой области спектра.

Несмотря на преимущества трехслойных покрытий, их производство развивалось медленно в силу следующих причин. Прежде всего изготовление таких покрытий представляет собой гораздо более сложную задачу, чем изготовление однослойных. Оптические толщины и показатели преломления всех трех слоев необходимо контролировать с очень высокой точностью. В процессе напыления уже невозможно контролировать их толщины по цвету отраженных от покрытия лучей. Толщины слоев в этом случае измеряются фотометрически при помощи специального прибора. Кроме того, рассеяние света в трехслойном покрытии значительно больше, чем в однослойном, а поглощение света в синей области спектра достигает 1%. С другой стороны, трехслойное покрытие отражает гораздо меньше света, чем однослойное, и находит применение во многих оптических приборах, для которых преимущество высокого пропускания преобладает над их высокой стоимостью и указанными выше недостатками.

Существуют и другие типы просветляющих покрытий, в том числе двухслойное узкополосное покрытие, часто используемое в лазерных оптических системах, а также трех- и четырехслойные покрытия, применяемые в инфракрасных оптических системах.

Описанные выше просветляющие покрытия уменьшают отражение света от границы раздела двух сред.

С другой стороны, многослойные покрытия используются для увеличения отражения света от поверхности и получения таким образом зеркал. В отличие от металлических зеркал, такие зеркала называются диэлектрическими, так как они состоят исключительно из диэлектрических пленок, т. е. пленок, не проводящих электрический ток. Такие покрытия применяются также для изготовления интерференционных светофильтров и светоразделительных пластинок.

Типичное диэлектрическое зеркало состоит из восьми чередующихся слоев с показателями преломления 1,38 и 2,32 (рис. 4). Слои с низким показателем преломления изготовлены из фтористого магния, а с высоким — из сульфида цинка. Такое покрытие называется *четвертьволновой стопой*, так как все слои имеют одинаковую оптическую толщину, равную одной четверти длины волны красной спектральной линии с длиной волны 0,63 мкм \*). Если показатели преломления слоев мало зависят от длины волны, то максимум отражения будет наблюдаться именно для этой длины волны.

Область высокого отражения лежит в пределах от 0,52 до 0,75 мкм. Вне этой области отражательная способность осциллирует, принимая то большие, то меньшие значения. Если поглощение в стопе незначительно, то отражательная и пропускательная способности зеркала должны в сумме составлять 100%. В реальных зеркалах, конечно, существует

---

\*) Длина волны 6328 Å соответствует излучению наиболее распространенного He-Ne-газового лазера. (Прим. перев.)

некоторое поглощение и рассеяние света в слоях, что ухудшает качество зеркала. Поэтому для получения отражательной способности, близкой к 100%, необходимо уменьшить поглощение и рассеяние света.

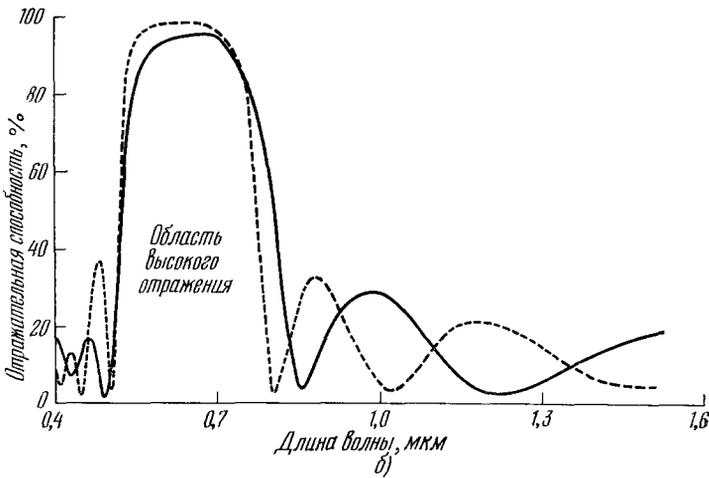
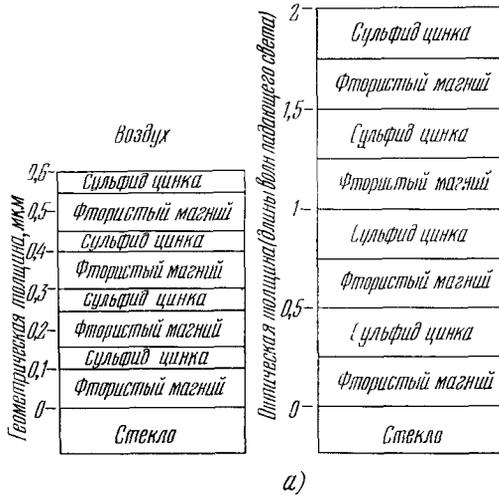


Рис 4 Диэлектрическое зеркало получается в результате нанесения последовательности оптических интерференционных слоев в таком порядке, что отражательная способность покрываемой поверхности увеличивается (зеркало такого типа называется диэлектрическим потому, что оно состоит исключительно из слоев, которые не являются проводниками электрического тока)

В схеме такого покрытия, изображенной на рис *с*), толщина слоев отсчитывается в единицах как геометрической, так и оптической толщины. Зеркало состоит из восьми чередующихся слоев фтористого магния (с показателем преломления 1,38) и сульфида цинка (с показателем преломления 2,32). Такое покрытие носит название *четвертьволновой ступи*, так как все слои имеют одинаковую толщину, равную четверти длины волны спектральной линии 0,69 мкм. Сплошная цветная кривая на рис *б*) показывает, что вблизи этой длины волны существует спектральная область высокого отражения. Штриховая кривая демонстрирует влияние увеличения числа слоев покрытия на его свойства и изображает спектральную отражательную способность 10-слойного диэлектрического зеркала состоящего из пяти слоев фтористого магния и пяти слоев сульфида цинка. Максимальный коэффициент отражения в этом случае возрастает с 96 до 98,5%, однако спектральная ширина области высокого отражения остается неизменной.

Максимальный коэффициент отражения зависит от показателя преломления слоев и их числа. Для заданного числа слоев максимальная отражательная способность растет при увеличении отношения показателей преломления соседних слоев. Например, если вместо сульфида цинка

использовать двуокись титана с показателем преломления 2,40, то максимальный коэффициент отражения возрастет с 96 до 97%. С другой стороны, при фиксированных показателях преломления слоев отражательная способность растет при увеличении их числа. Например, коэффициент отражения десятислойного покрытия равен 98,5% по сравнению с 96% у восьмислойного. Спектральная ширина области максимального отражения зависит, однако, только от показателей преломления слоев, а не от их числа.

Появление спектральной области высокого отражения можно легко объяснить, если рассматривать многослойное покрытие как периодическую

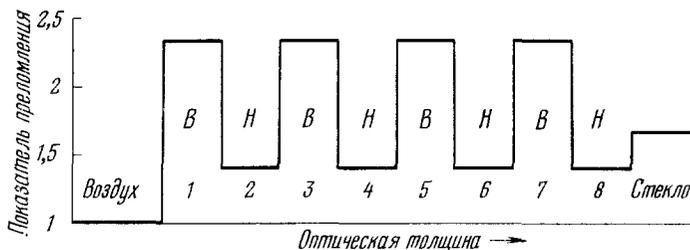


Рис. 5. Четвертьволновую стопу можно рассматривать как периодическую структуру, в которой многократно повторяются слои с двумя разными показателями преломления. Для восьмислойной четвертьволновой стопы, изображенной на рис. 4, слой с высоким показателем преломления обозначен через *B*, а с низким — через *H*. В рассматриваемом случае период структуры *BH* повторяется четыре раза.

среду, в которой показатель преломления меняется периодически в направлении распространения света. Если для четвертьволновой стопы графически изобразить зависимость показателя преломления от оптической толщины и обозначить слои с высоким показателем преломления через *B*, а слои с низким показателем преломления через *H*, то период структуры будет *BH* (рис. 5). Восьмислойное покрытие, описанное выше, содержит четыре таких периода, а десятислойное — пять.

Спектральная ширина области высокого отражения определяется путем расчета изменения амплитуды волны, прошедшей расстояние, равное одному периоду структуры. Если амплитуда световой волны, имеющей некоторую длину волны, уменьшается, то для нее будет наблюдаться высокое отражение. Так как среда непоглощающая, единственная причина, которая может приводить к ослаблению прошедшей волны, это отражение. В случае четвертьволновой стопы отражение будет иметь место в том случае, когда оптическая толщина периода структуры равна половине длины волны. Для других длин волн амплитуда волны, прошедшей расстояние, равное периоду, может иногда возрастать, а иногда уменьшаться. Такие световые волны будут проходить сквозь диэлектрическое зеркало.

Усиление отраженной волны может происходить не только в том случае, когда периодическая структура состоит из отдельных однородных слоев, имеющих постоянный показатель преломления. Это явление может наблюдаться также в оптически неоднородных средах, в которых показатель преломления периодически меняется в направлении распространения световой волны. В общем случае свет может сильно отражаться от любой среды, в которой существует периодическая модуляция скорости распространения волны.

Природа дает много поразительных примеров таких периодических структур. Радужная окраска этих объектов объясняется их структурой, для которой характерно пространственно-периодическое изменение пока-

зателя преломления. Как может наблюдатель отличить окраску такого рода от окраски, вызванной химическими красителями или чернилами? Один метод основан на том, что интерференционные цвета меняются при изменении угла наклона освещающего светового пучка. Например, если осветить павлинье перо светом лампы накаливания, то легко заметить, как по мере уменьшения угла падения освещающего светового пучка изменяется окраска. Изменение цвета происходит в сторону уменьшения длины волны: красный цвет сменяется желтым, желтый зеленым, а зеленый синим. Крылья многих жуков и бабочек также имеют интерференционную окраску. Периодическая структура отчетливо видна и на электронной микрофотографии пластинки пера колибри.

Диэлектрические зеркала отличаются от обычных металлических тем, что, во-первых, их коэффициент отражения может достигать очень высоких значений и, во-вторых, поглощение света в них сравнительно мало. Эти преимущества диэлектрических зеркал существенны для работы многих оптических приборов. Например, в интерферометре Фабри — Перо, который является оптическим резонатором, состоящим из двух параллельных друг другу пластин из плавленного кварца, внутренние поверхности пластин представляют собой частично прозрачные зеркала (рис. 6). Этот прибор в течение многих лет использовался для исследования с высокой разрешающей способностью спектрального профиля эмиссионных спектральных линий. До 1950 г. пластины интерферометра, как правило, покрывались слоем серебра, имеющим обычно коэффициент отражения 90% при пропускании 6% и поглощении 4%. Отражательная способность, равная 90%, вполне достаточна для многих целей, и даже при использовании диэлектрического покрытия вместо серебряного редко требуется коэффициент отражения больше 90%.

Несмотря на то, что серебряные покрытия имеют многочисленные применения, потери на поглощение в каждой пластине существенно уменьшают общую пропускательную способность интерферометра. При расчете пропускательной способности интерферометра недостаточно учитывать только поглощение в покрытии зеркал. Общее пропускание интерферометра определяется отношением поглощения в покрытии к его пропусканию. При уменьшении этого отношения растет эффективность интерферометра и его пропускательная способность увеличивается. Например, для серебряного покрытия это отношение равно 6 : 4 и общая пропускательная способность составляет всего 36%.

В начале 50-х годов для увеличения эффективности интерферометров начали вместо серебряных применять диэлектрические покрытия. Типичное диэлектрическое зеркало имеет коэффициент отражения 90% при

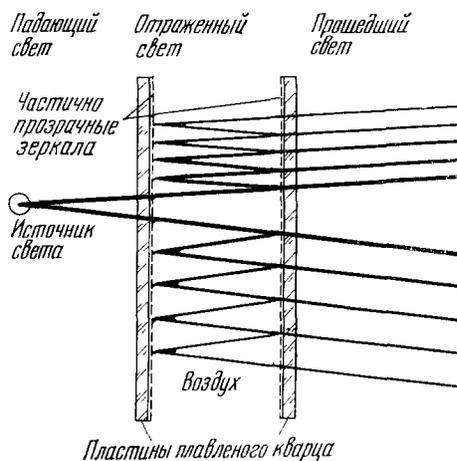


Рис. 6. В интерферометре Фабри — Перо, схема которого представлена на этом рисунке, могут использоваться частично прозрачные диэлектрические зеркала. Диэлектрические покрытия, нанесенные на пластины плавленного кварца, образуют оптический резонатор интерферометра и обладают высоким коэффициентом отражения при незначительном поглощении света внутри покрытия. Использование таких зеркал увеличивает интенсивность проходящего сквозь интерферометр света и тем самым повышает его эффективность. Прибор может применяться для изучения распределения энергии внутри спектральной линии.

поглощению 0,5% и пропусканию 9,5%. Здесь отношение поглощения к пропусканию гораздо меньше, чем у серебряного зеркала, и общая пропускательная способность интерферометра достигает 90%.

В некоторых случаях пластины интерферометров и в настоящее время покрывают серебряными или алюминиевыми пленками. Такие покрытия имеют то преимущество, что их отражательная способность практически постоянна для всех длин волн, в отличие от четвертьволновой стопы, коэффициент отражения которой резко меняется в некоторых областях спектра. Можно рассчитать диэлектрические покрытия, имеющие более широкую спектральную область высокого отражения, чем четвертьволновая стопа: но их изготовление представляет собой очень сложную задачу.



Рис. 7. В гелий-неоновом лазере используются диэлектрические зеркала. Только зеркала такого типа могут иметь коэффициент отражения, близкий к 100%, который необходим для работы с коэффициентом усиления около 1%.

Диэлектрические зеркала являются важным элементом лазеров, в частности газового лазера. Газовый лазер состоит из двух частей — газоразрядной трубки и оптического резонатора (рис. 7). Газоразрядная трубка наполнена ионизованным газом, возбуждаемым электрическим разрядом. Лазерная трубка имеет обычно коэффициент усиления, равный 1% \*). Это означает, что световая волна с начальной интенсивностью, равной 100 единицам, после однократного прохождения трубки имеет интенсивность в 101 единицу. Газоразрядная трубка помещена в оптический резонатор, аналогичный интерферометру Фабри — Перо. Когда усиленная волна отражается от одного из зеркал, она испытывает потери, связанные с тем, что коэффициент отражения зеркала меньше 100%. Если потери при отражении превосходят коэффициент усиления лазерной трубки, то лазер работать не будет. Если в рассмотренном выше примере коэффициент отражения не превосходит 99%, то генерация невозможна. Коэффициент усиления порядка 1% типичен для многих газовых лазеров, и, следовательно, без диэлектрических зеркал нельзя вызвать генерацию лазера, так как только такие зеркала способны иметь коэффициент отражения, близкий к 100% \*\*).

Диэлектрические покрытия с периодической структурой очень широко применяются также в качестве интерференционных светофильтров. Такие фильтры обладают высоким пропусканием в некоторой спектральной области и имеют сильное отражение во всех остальных областях спектра. Как получается высокое отражение от периодической структуры, было изложено выше. При изготовлении интерференционного фильтра надо

\*) В современных лазерах коэффициент усиления может достигать значений, значительно превосходящих 1%. (Прим. перев.)

\*\*\*) Мощный световой поток, излучаемый лазером, достигается многократным прохождением света через активную среду, находящуюся между зеркалами резонатора. (Прим. перев.)

только слегка изменить эту структуру, чтобы получить оптимальные условия для пропускания света в нужной спектральной области. В качестве примера рассмотрим структуру фильтра, предназначенного для отражения теплового излучения, лежащего в инфракрасной области спектра, и пропускания видимого света. Большинство диэлектрических слоев такого

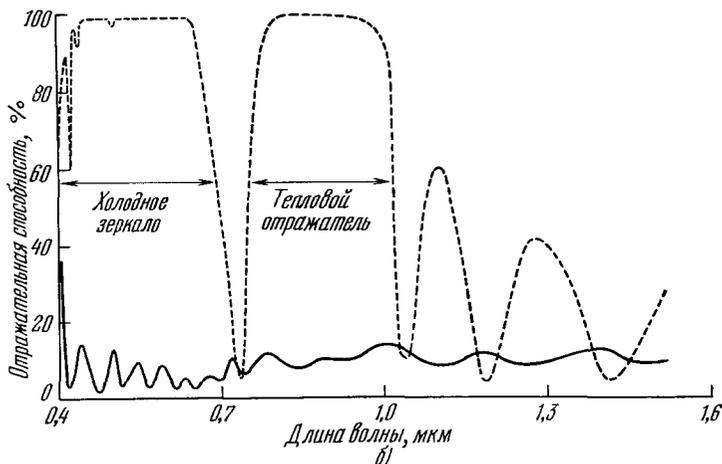
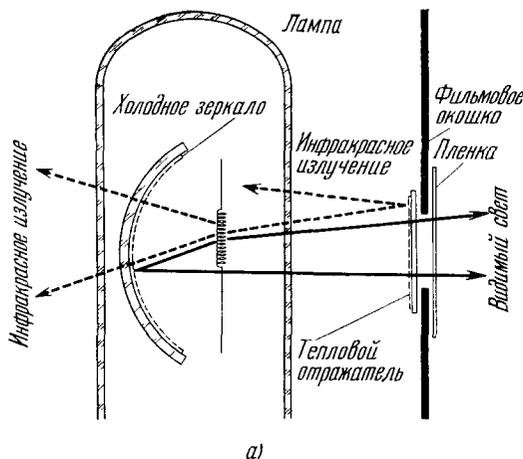


Рис. 8. В кинопроекторе многослойные диэлектрические покрытия используются для двух целей: а) как тепловой отражатель, помещаемый между проекционной лампой и фильмовым окошком и отражающий инфракрасное тепловое излучение; б) как холодное зеркало, расположенное за источником света и отражающее на пленку только видимый свет, в то время как инфракрасное излучение беспрепятственно выходит наружу из осветителя кинопроектора (а).

На рис. б) представлены кривые спектральной отражательной способности обоих элементов: сплошная кривая относится к холодному зеркалу, а штриховая — к теплому отражателю. Пропускательная способность покрытий с высокой точностью равна разности между единицей и их отражательной способностью.

фильтра имеет оптическую толщину, равную четверти длины волны  $0,89 \text{ мкм}$ , которая соответствует области наиболее сильного отражения. Некоторые слои наносят другой толщины, чтобы улучшить пропускание в видимой области спектра. Такой тепловой отражатель часто помещают перед фильмовым окошком кинопроекционного аппарата для того, чтобы защитить кинопленку от теплового излучения. Он значительно более

эффективен, чем теплопоглощающие стекла, которые также применяются для этой цели.

Другой часто применяемый интерференционный светофильтр обладает высоким отражением в видимой области спектра и незначительным отражением в инфракрасной. Такое покрытие, которое называется *холодным зеркалом*, наносится на рефлектор, расположенный за вольфрамовой проекционной лампой кинопроектора. Значительная часть излучения такой лампы представляет собой тепловое излучение, которое невидимо для человеческого глаза, но может нагревать и даже повреждать кинолентку.

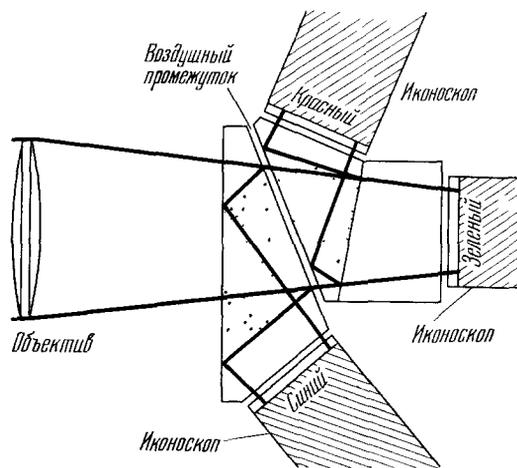


Рис. 9. Цветная телевизионная камера состоит в основном из трех компонентов: объектива, устройства для расщепления светового пучка и трех иконоскопов, превращающих свет в электрические сигналы

Свет, отраженный от сцены, которая передается по телевидению, распределяется по «красному», «зеленому» и «синему» каналам при помощи интерференционных светофильтров, нанесенных на грани призм (изображены на рисунке тонкими линиями в центре и правее), из которых состоит устройство для расщепления светового пучка. Сигналы, поступающие от «красного», «зеленого» и «синего» иконоскопов, образуют соответствующие цвета на экране телевизионного приемника.

«синий» канал, отражает синие лучи и пропускает более длинноволновые зеленые и красные. Сигналы, поступающие из «красного», «зеленого» и «синего» иконоскопов, создают соответственно красный, зеленый и синий цвета на экране телевизионного приемника.

Такие интерференционные светофильтры и диэлектрические зеркала могут быть изготовлены для работы практически с любой длиной волны от ультрафиолетовой до далекой инфракрасной области спектра. Рабочая длина волны зависит от толщины слоев, из которых состоит покрытие. Главная трудность в получении покрытий для работы в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра связана с тем, что существует мало материалов, прозрачных для таких излучений и пригодных для изготовления тонких слоев. Однако многие затруднения такого рода уже преодолены, и в настоящее время существуют покрытия для области спектра от 0,2 до 18 мкм. Инфракрасные фильтры являются важными деталями таких устройств, как лазер на двуокиси углерода, инфракрасные газоанализаторы, системы управления ракетами и снарядами, горизонтоискатели для искусственных спутников и т. д.

Холодное зеркало отражает видимый свет на кинолентку и позволяет инфракрасному излучению выйти из осветителя кинопроектора. Особенно эффективно использование такого зеркала в сочетании с тепловым отражателем (рис. 8).

Интерференционные светофильтры являются также важной деталью цветных телевизионных камер, которые в основном состоят из объектива, устройства для расщепления светового пучка и иконоскопов, превращающих свет в электрический сигнал (рис. 9). Три канала регистрируют основные цвета сцены, которая передается по телевидению. Свет разделяется по цветам и направляется в «красный», «зеленый» и «синий» каналы при помощи интерференционных фильтров, нанесенных на грани призм, из которых состоит устройство для расщепления светового пучка. Например, диэлектрическое зеркало, направляющее свет в

Интерференционные светофильтры, имеющие гораздо более узкую полосу пропускания, чем описанные выше, также находят широкое применение. Простейший из таких фильтров работает на том же принципе, что и интерферометр Фабри — Перо. Фильтр состоит из двух частично прозрачных серебряных слоев, пространство между которыми заполнено фтористым магнием (рис. 10). Таким образом, в этом случае оптический

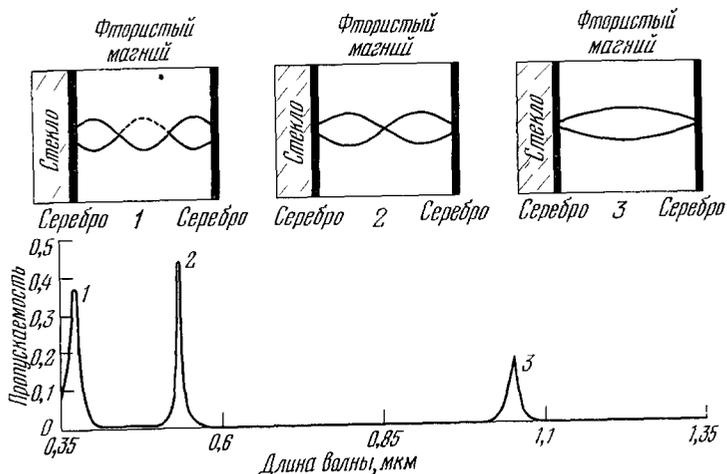


Рис. 10 Оптический резонатор интерференционного светофильтра заполнен твердым фтористым магнием, в отличие от интерферометра Фабри — Перо, между частично прозрачными зеркалами которого находится воздух (в этом случае длина волны, соответствующая максимальному пропусканию, зависит от толщины слоя фтористого магния). Максимумы полос пропускания первого, второго и третьего порядков находятся при 1,06 мкм (3), 0,537 мкм (2) и 0,370 мкм (1). На толщине слоя фтористого магния при этом укладывается соответственно половина длины волны, две полуволны и три полуволны. Когда в резонаторе образуется стоячая волна, она проникает в металл, и поэтому узлы стоячих волн как бы перенесены на 1/12 длины волны за поверхность металлического покрытия.

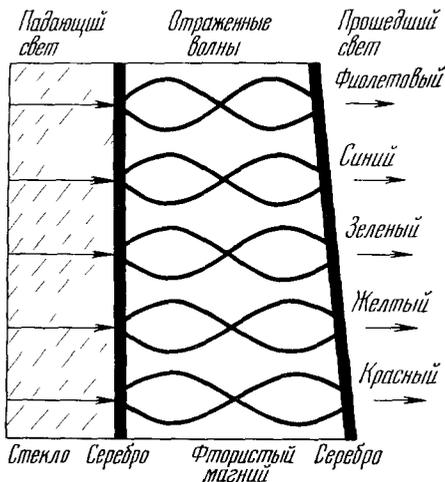


Рис. 11. Клинообразный слой фтористого магния заключен между двумя частично прозрачными серебряными зеркалами.

Свет разной длины волны проходит через различные участки клинообразного интерференционного светофильтра. Толщина фильтра на рисунке сильно преувеличена.

резонатор заполнен фтористым магнием, в отличие от интерферометра Фабри — Перо, между зеркалами которого находится воздух. Пропус-

вание такого фильтра имеет максимальное значение для той длины волны, для которой оптическая толщина слоя фтористого магния равна целому числу полуволн. Длина волны максимального пропускания варьирует с изменением толщины слоя. Если слой между серебряными

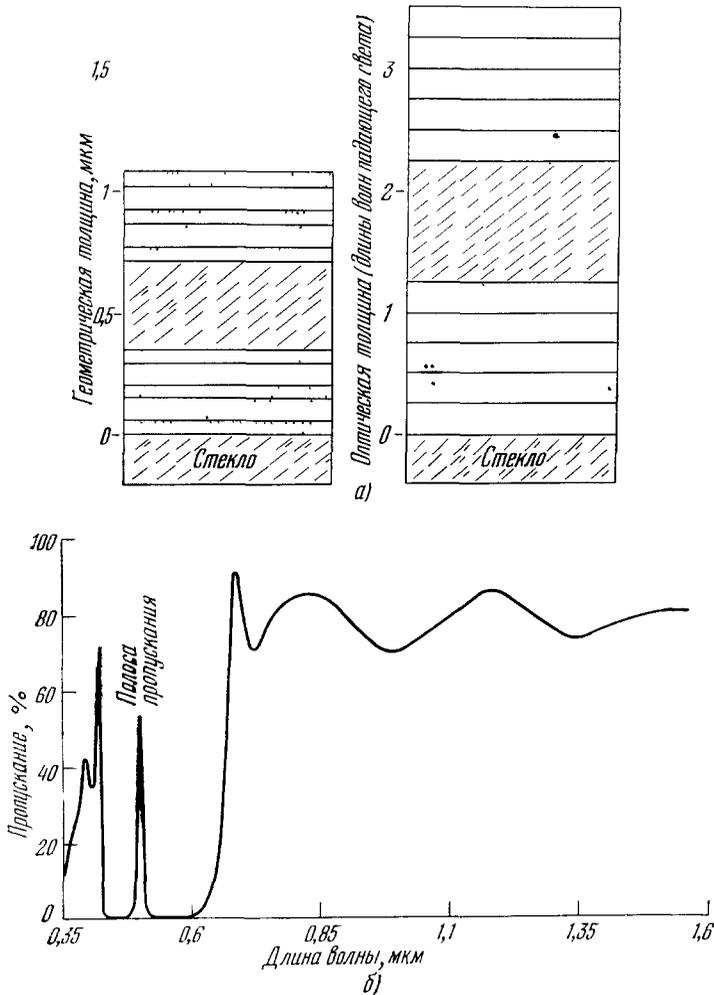


Рис 12. В полностью диэлектрическом интерференционном светофильтре серебряные зеркала заменены диэлектрическими

Фильтр такого типа обычно состоит из пятислойной четвертьволновой стопки, слоя фтористого магния и второй аналогичной стопки (а). Как следует из кривой пропускания такого фильтра, представленного на рис (б) полностью диэлектрический светофильтр имеет более узкую полосу пропускания, чем фильтр с серебряными зеркалами. В рассматриваемом случае полоса пропускания находится в области 0,5 мкм. Излучение с длинами волн меньше 0,4 мкм и больше 0,6 мкм может быть устранено при помощи дополнительных обычных абсорбционных светофильтров

покрытиями имеет форму клина, то для разных длин волн максимальное пропускание будет наблюдаться в различных участках фильтра (рис 11). Если поместить такой фильтр между двумя щелями, легко сконструировать простейший монохроматор. При перемещении клина между щелями будет меняться длина волны света, выходящего из монохроматора.

По аналогии с интерферометром Фабри — Перо серебряные зеркала в таком фильтре можно заменить диэлектрическими и изготовить полностью диэлектрический интерференционный светофильтр. Он состоит

из четвертьволновой стопы, слоя фтористого магния и второй аналогичной стопы (рис. 12). По сравнению с фильтром, в котором применяются серебряные слои, полностью диэлектрический светофильтр имеет большее пропускание в максимуме и более узкую полосу пропускания, которая у некоторых фильтров составляет всего несколько ангстрем.

Такие узкополосные светофильтры используются в коронографах, спектроанализаторах и других приборах, где необходимо выделять узкую область спектра. Например, в лазерном дальномере свет лазера освещает удаленный предмет, и расстояние до него определяется по времени распространения света до предмета и обратно. Этот прибор может работать при ярком дневном освещении, так как его приемник снабжен узкополосным фильтром, который пропускает свет лазера и практически полностью отражает солнечный свет.

В этой статье были описаны простые интерференционные покрытия и некоторые их применения. В настоящее время уже налажено промышленное производство покрытий такого типа, а также и более сложных покрытий, некоторые из которых содержат до 100 слоев. Конструирование и производство таких покрытий очень перспективно и в настоящее время является процветающей областью оптической промышленности. Исследования в этой области включают в себя такие вопросы, как разработка новых методов получения оптических интерференционных покрытий, изучение новых материалов, пригодных для их изготовления, повышение их прочности и твердости. Технология производства оптических интерференционных покрытий очень интенсивно развивалась на протяжении последних двадцати лет, и, по-видимому, в дальнейшем темпы такого развития снижаться не будут.

#### ЛИТЕРАТУРА

Physics of the Thin Films: Advances in Research and Development, vols I—V, ed. by G. Hass and R. F. Thun, N. Y., Academic Press, 1963—1969.— F. A b e l é s, сборник «Advanced Optical Techniques», ed. by A.C.S. van Heel, Amsterdam, North-Holland, 1967.— H. A. M a c l e o d, Thin Film Optical Filters, N.Y., American Elsevier Publ. Co., Inc., 1969.

---