

# Лабораторная работа № 23

## Светофильтры – простейшие монохроматоры света

Оборудование: набор светофильтров, спектрофотометр СФ-46

Цель работы: ознакомление с принципами действия основных типов светофильтров — абсорбционных, отражательных, интерференционных и дисперсионных, экспериментальное определение их основных параметров.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Проблема монохроматизации света, т.е. выделение определенного спектрального интервала длин волн, имеет большое практическое значение. Одним из способов монохроматизации света является применение различного рода монохроматоров. При решении большинства задач практической спектроскопии сравнительно узкие спектральные области излучения можно выделить с помощью монохроматических светофильтров. В отличие от спектральных приборов — монохроматоров — монохроматические светофильтры обладают значительно большим сечением фильтруемого пучка и большей апертурой.

*Светофильтрами*, или просто *фильтрами*, называются устройства, меняющие спектральный состав или энергию падающей на них световой энергии без изменения формы ее фронта. Основные характеристики (параметры) светофильтров следующие.

#### 1. Пропускание (прозрачность) в максимуме полосы пропускания

$$T = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}, \quad (1)$$

где  $I_0$  — интенсивность света, падающего на светофильтр;  $I$  — интенсивность света, прошедшего через светофильтр в максимуме полосы пропускания (рис. 1). Наряду с этой величиной светофильтр характеризуется оптической плотностью  $D$ . По определению,

$$D = \lg \frac{1}{T} = \lg \frac{I_0}{I}. \quad (2)$$

Если не учитывать многократных отражений в системе фильтров, то оптическая плотность нескольких последовательно расположенных фильтров равна сумме их плотностей:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i. \quad (3)$$

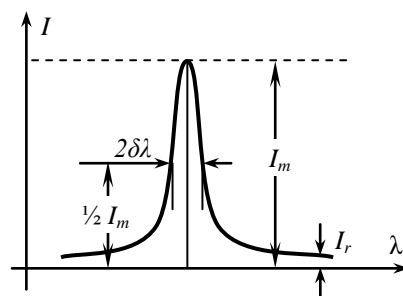


Рис. 1. Контур полосы пропускания светофильтра

2. Длина волны  $\lambda_{\max}$ , соответствующая максимуму полосы пропускания.

3. *Спектральная ширина* полосы пропускания  $2\delta\lambda$ , равная ширине спектрального интервала, на границах которого интенсивность прошедшего света равна половине интенсивности в максимуме полосы пропускания:

$$I(\lambda) = \frac{1}{2} I_{\max} . \quad (4)$$

4. *Крылья полосы пропускания* — остаточная пропускательность  $I_{\min}$  в области спектра, отстоящего от  $\lambda_{\max}$  на расстоянии, много большем  $\lambda_{\max}$ . Вместо остаточной пропускательности часто пользуются фактором контрастности светофильтра

$$C = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} . \quad (5)$$

5. *Апертура светофильтра* — угловая ширина светового пучка  $2\delta\theta$ , при которой монохроматичность светофильтра еще не ухудшается заметно от углового расширения падающего светового пучка.

Светофильтры называются *серыми* или *нейтральными*, если их оптическая плотность в исследуемом спектральном интервале не зависит от длины волны. Фильтры, не удовлетворяющие этому условию, определяются как *селективные*. Селективные светофильтры предназначаются либо для отделения широкой области спектра, либо для выделения узкой спектральной области. Светофильтры последнего типа называются *узкополосными*, или *монохроматическими*. Достаточно серыми в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра являются тонкие пленки алюминия и платины, полученные путем напыления металла на стеклянную или кварцевую подложку. Следует отметить, что даже самые лучшие серые фильтры обладают некоторой селективностью. Для изменения спектральных свойств излучения или спектральной чувствительности приемников служат так называемые *корректирующие* светофильтры. С их помощью, например, можно приблизить спектр лампы накаливания к сплошному спектру солнца или спектральную чувствительность фотоэлемента привести в соответствие со спектральной чувствительностью глаза. Узкополосные, монохроматические, светофильтры часто применяются вместо других спектральных приборов. Их преимущество заключается в возможности непосредственно измерять распределение спектральной яркости по площади источника. Наряду с этим светофильтры обычно пропускают гораздо больший поток, чем приборы с диспергирующими элементами (призмами, дифракционными решетками и т. п.). Однако разрешающая способность светофильтра невелика — в большинстве случаев ширина полосы пропускания составляет десятки и сотни ангстрем. Лучшие узкополосные монохроматические светофильтры имеют ширину полосы пропускания менее  $1 \text{ \AA}$ , однако количество пропускаемого ими света невелико. Поэтому основное назначение светофильтров при спектральных исследованиях — грубая монохроматизация или неселективное ослабление излучения.

Существуют различные типы монохроматических светофильтров.

**Абсорбционные светофильтры.** Наиболее широко применяются. Ослабление света в них происходит главным образом в результате поглощения веществом фильтра. Частичное ослабление света обусловлено также отражением от поверх-

ностей фильтра. Эти потери относительно невелики. Невелики и те потери, которые связаны с рассеянием света в объеме поглощаемого тела и на его поверхности. Световой поток (интенсивность), прошедший через поглощающий слой, ослабляется в соответствии с законом Бугера-Ламберта:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-k(\lambda) \cdot l}, \quad (6)$$

где  $k(\lambda)$  — коэффициент поглощения;  $l$  — толщина слоя. Закон Бугера-Ламберта можно считать применимым практически всегда, за исключением очень больших световых потоков, создаваемых лазерами.

Коэффициент пропускания абсорбционных светофильтров определяется формулой

$$T(\lambda) = [1 - r(\lambda)]^2 \cdot e^{-k(\lambda) \cdot l}, \quad (7)$$

где  $r$  — коэффициент отражения света на поверхности фильтра. Обычно в таблицах, характеризующих светофильтры, приводятся значения оптической плотности  $D$  для рабочей толщины фильтра без учета потерь на отражение. Пропускание плоско-параллельного абсорбционного светофильтра зависит от угла падения, и относительное изменение пропускания такого фильтра описывается выражением

$$\frac{dT}{T} \cong 1,2 D \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}, \quad (8)$$

Следует иметь в виду, что задержанный абсорбционным фильтром световой поток полностью преобразуется в тепло и фильтры сильно нагреваются. Это приводит к некоторому изменению оптических характеристик светофильтров.

В настоящее время наиболее употребительны стеклянные абсорбционные светофильтры. Нашей промышленностью выпускается набор цветных стекол размером  $80 \times 80$  и  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>, состоящий из 117 паспортизованных образцов. Стеклянные светофильтры обладают по сравнению с другими рядом преимуществ, к которым в первую очередь следует отнести устойчивость к световым и тепловым воздействиям, а также однородность и высокое оптическое качество. Ассортимент цветных стекол почти во всех случаях позволяет решать задачу предварительной монохроматизации или отсека нежелательной части спектра. Располагая друг за другом несколько стеклянных светофильтров, можно получить довольно узкополосные фильтры для всей видимой и ближней ультрафиолетовой части спектра.

Сравнительно реже применяются жидкостные и газовые абсорбционные фильтры. Светофильтры подобного типа используются преимущественно для ультрафиолетовой области, так как стеклянные светофильтры для этой области разработаны слабо. Известно применение для выделения ультрафиолетовой области спектра кварцевой кюветы с насыщенными парами брома. Такая кювета практически непрозрачна в области 4000–6000 Å. Воздух служит естественным газовым фильтром, действующим во всех спектроскопических исследованиях, с невакуумной аппаратурой. Воздух непрозрачен для области спектра с длиной волны короче 1800 Å благодаря главным образом поглощению кислорода.

Для оптических свойств полупроводников наиболее типично существование резкого края поглощения  $\lambda_0$  (рис. 2). Они непрозрачны для излучения с длиной волны менее  $\lambda_0$  и прозрачны для более длинноволнового излучения. Положение края поглощения определяется зонной структурой полупроводника и соответствует энергии перехода из валентной зоны в зону проводимости. Таким образом, полупроводник — прекрасный светофильтр, резко ограничивающий спектр с

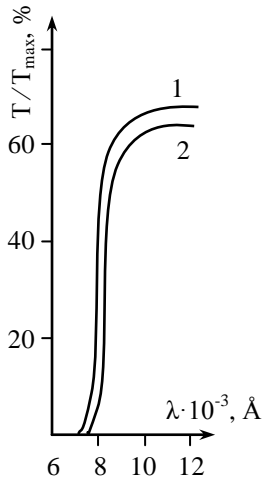


Рис. 2. Спектральное пропускание полупроводникового фильтра при двух различных температурах (1, 2).

коротковолновой стороны. Следует отметить, что только у немногих полупроводников край поглощения лежит в видимой области спектра. Большинство полупроводников прозрачно лишь в инфракрасной области. Стеклопленочные фильтры типа ЖС, ОС, КС обязаны своими свойствами присутствию мельчайших полупроводниковых кристаллов  $CdS$  —  $CdSe$ . Светофильтры из желатиновых и других органических окрашенных пленок применяются сравнительно редко. Недостатки таких светофильтров — малая механическая прочность, низкая термическая устойчивость и необратимое выцветание. Следует отметить,

что спектральные характеристики абсорбционных светофильтров изменяются под действием нагревания и облучения.

**Отражательные светофильтры.** К ним относятся металлические пленки и диэлектрические покрытия для приготовления нейтральных и селективных светофильтров. Используются тонкие металлические пленки. Такие пленки наносятся на кварцевую или стеклянную подложку испарением в высоком вакууме или катодным распылением. На рис. 3 приведены спектральные коэффициенты отражения серебра и алюминия. Для получения нейтральных металлических слоев обычно используют платину, палладий и родий, реже — алюминий. Тонкие металлические пленки серебра и щелочных металлов могут служить для выделения разных участков в ультрафиолетовой области спектра. В отличие от абсорбционных фильтры из металлических пленок ослабляют свет главным образом в результате отражения от поверхности. Металлические пленки, как правило, изменяют пропускание под действием атмосферного воздуха. Прозрачность свежизготовленной алюминиевой пленки очень быстро увеличивается вследствие образования на ее поверхности слоя  $Al_2O_3$ . В дальнейшем пропускание пленки меняется очень медленно.

Многослойные диэлектрические зеркала тоже принадлежат к отражательным светофильтрам. Для многолучевой интерферометрии важно иметь отражатели

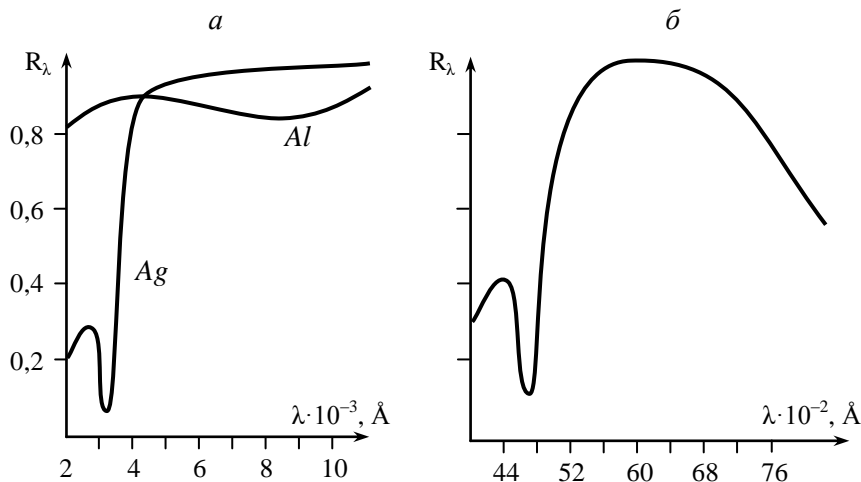


Рис. 3. Спектральные коэффициенты отражения: а — серебра и алюминия; б — многослойного диэлектрического зеркала

(зеркала) с очень высоким коэффициентом отражения, заметным коэффициентом пропускания и как можно меньшим коэффициентом поглощения. Необходимость изготовления таких зеркал за последние годы сильно возросла в связи с бурным развитием лазерной техники. Металлические зеркала в большинстве случаев не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к работе с интерферометрами и лазерами. Методы многолучевой интерферометрии позволяют создать отражательные системы с большим отражением при очень малых потерях на поглощение.

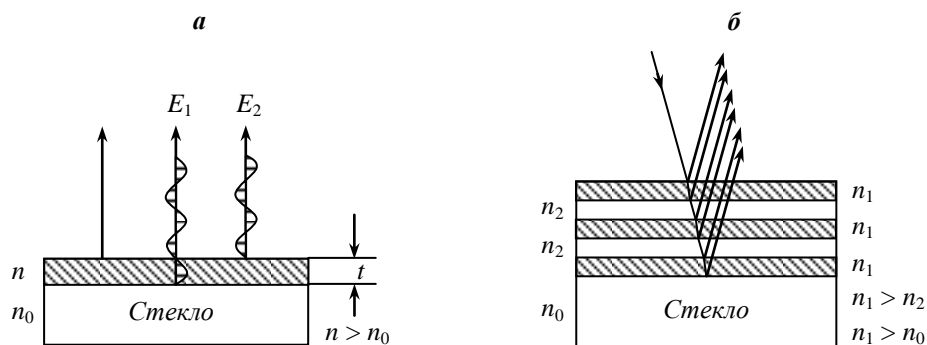


Рис. 4. Схемы, поясняющие увеличение отражения: диэлектрическая пленка с оптической толщиной  $nt = \lambda/4$  (а) и многослойное отражательное диэлектрическое покрытие (б).

На рис. 4, а приведена схема, поясняющая увеличение отражения диэлектрической пленкой с оптической толщиной  $\lambda/4$ . На поверхность стеклянной или кварцевой подложки, показатель преломления которой равен  $n_0$ , наносится слой диэлектрика толщиной  $nt = \lambda/4$ . Показатель преломления  $n$  этого диэлектрического слоя должен быть больше  $n_0$  ( $n > n_0$ ). В этом случае волны, отраженные от передней и задней поверхности слоя, находятся в одинаковой фазе — «потере полуволны», т.е. изменение фазы на  $\pi$  происходит только на передней поверхности пленки и обе волны усиливают друг друга, так как оптическая разность хода между ними составляет  $\lambda/4 + \lambda/4 + \lambda/2 = \lambda$ . Общая разность фаз соседних интерферирующих волн  $2\pi$ . Следовательно, все лучи интерферируют на усиление. Проходящие световые волны в этом случае, наоборот, интерферируют на ослабление. Однако добиться высоких коэффициентов отражения ( $R_\lambda > 30\%$ ) таким образом практически невозможно. Эффект значительно усилится, если перейти от интерференции двух лучей к многолучевой интерферометрии. Тогда интерференционные максимумы окажутся более острыми и их интенсивность резко возрастет.

Селективные отражающие светофильтры представляют собой многослойные диэлектрические интерференционные зеркала, которые получают нанесением на прозрачную подложку чередующихся тонких диэлектрических слоев с одинаковой оптической толщиной, задаваемой условием

$$n_1 t_1 = n_2 t_2 = \frac{\lambda}{4},$$

но с разными показателями преломления: между двумя слоями диэлектрика с высоким показателем преломления  $n_1$  помещают слой диэлектрика с малым показателем преломления  $n_2$  (рис. 4, б). В этом случае все лучи (все отраженные волны) синфазны (разность фаз с учетом скачка фаз на границе раздела слоев  $n_1$  и  $n_2$  равна  $2\pi$ ) и усиливают друг друга в результате интерференции. Разность хода,

которую отраженные лучи приобретают в каждом из слоев, составляет

$$2n_1t_1 = 2n_2t_2 = \frac{\lambda}{2}$$

Для некоторого интервала длин волн, близкого по ширине к  $\lambda$ , в результате интерференции всех взаимодействующих волн получается максимум, ширина которого тем меньше, чем больше число интерферирующих пучков. Комбинируя слои различной толщины, можно в более или менее широких пределах синтезировать нужные спектральные кривые для коэффициента отражения. Для получения коэффициентов отражения  $R \sim 99\%$  и более (такие коэффициенты необходимы в лазерной технике) нужно нанести 11–13 слоев и более (см. рис. 4, б). Подобные интерференционные зеркала отражают в довольно узкой спектральной области, и чем больше коэффициент отражения, тем уже область длин волн  $\Delta\lambda$ , внутри которой реализуется такое значение  $R_\lambda$ .

В настоящее время технология изготовления диэлектрических зеркал разработана достаточно хорошо. В качестве материала для пленок применяется криолит,  $MgF_2$ ,  $SiO_2$  с  $n = 1,3 - 1,4$  и  $PbCl_2$ ,  $TiO_2$ ,  $ZnS$  с  $n = 2,2 - 2,3$ . Слои получаются последовательным испарением в вакууме веществ с низким и высоким показателями преломления. Испарение ведется из вольфрамовых лодочек, нагреваемых электропечами. Процесс контролируется по величине коэффициента отражения или пропускания слоев.

Аналогичная задача решается в вопросах «просветления» оптики, где решающую роль играет, наоборот, уменьшение потерь вследствие отражения на каждой стеклянной поверхности. Для этого на поверхность (подложку) необходимо наносить слой диэлектрика с показателем преломления  $n_1$  меньшим, чем показатель преломления подложки  $n_2$  ( $n_1 < n_2$ ). Оптическая толщина слоя должна удовлетворять условию  $n_1t_1 = \lambda/4$ . В этом случае волны, отраженные от передней и

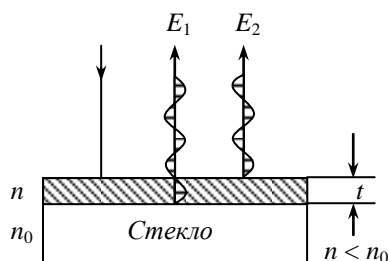


Рис. 5. Схема, поясняющая «просветление» оптики.

задней поверхности слоя, находятся в противофазе, так как оптическая разность хода между ними составляет  $2n_1t_1 = \lambda/2$ , а изменение фазы на  $\pi$  происходит на обеих поверхностях (рис. 5). В результате интерференции эти волны ослабляют друг друга. Наибольшее ослабление ( $R_\lambda \sim 0$ ) наблюдается тогда, когда амплитуды интерферирующих волн близки по величине. При этом показатель преломления диэлектрика, пригодного для «просветления» оптики, подбирается из условия

$$\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \text{ т.е. } n_1 = \sqrt{n_0}$$

Обычно просветление оптики выполняется для средней желто-зеленой области спектра. Для краев видимого спектра коэффициент отражения  $R_\lambda$  заметно отличается от нуля. Именно поэтому просветленные объективы кажутся в отраженном свете пурпурными, что соответствует смещению красного и фиолетового цветов.

**Интерференционные светофильтры.** Широкое распространение получили интерференционные светофильтры, основанные на явлении многолучевой интерференции. На рис. 6 показан внешний вид интерференционного светофильтра. Простейший интерференционный светофильтр состоит из плоскопараллельной

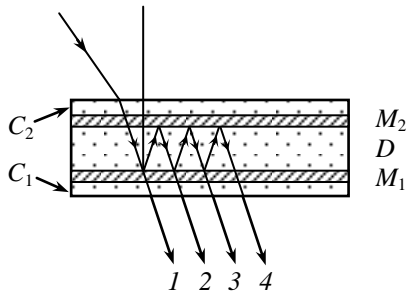


Рис. 6. Внешний вид интерференционного светофильтра.

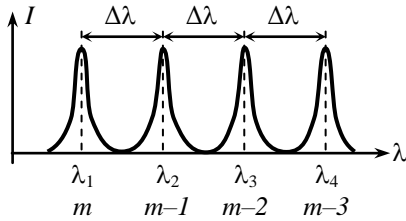


Рис. 7. Полосы пропускания интерференционного светофильтра

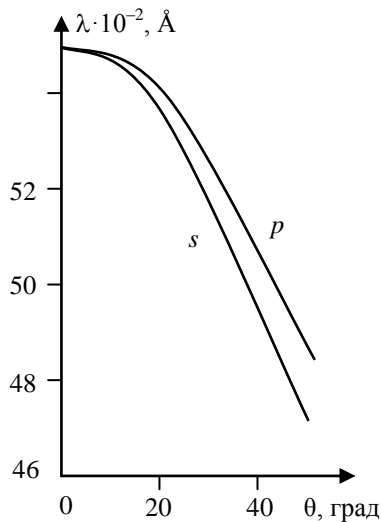


Рис. 8. Расщепление полосы пропускания на компоненты  $s$  и  $p$  при наклонном падении света на фильтр.

пластинки типа интерферометра Фабри-Перо с очень малым расстоянием  $t$  между зеркалами (порядка нескольких длин волн или нескольких десятков длин волн). Конструктивно интерференционный светофильтр представляет собой также стеклянную или кварцевую подложку  $C_1$  диаметром в несколько сантиметров, хорошо отполированную с обеих сторон, на одну из которых наносится путем испарения в вакууме последовательно полупрозрачный отражающий слой  $M_1$ , затем прозрачный разделительный слой  $D$  из диэлектрика с оптической толщиной  $nt = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$ , где  $m$  — целое число, и после этого

второй отражающий полупрозрачный слой  $M_2$ . Для защиты от механических повреждений и вырезания ненужных полос пропускания нанесенные слои покрываются второй стеклянной пластинкой  $C_2$  из цветного стекла (абсорбционным светофильтром). Зеркала  $M_1$  и  $M_2$  могут быть как металлическими, так и многослойными диэлектрическими. Падающая на такую систему световая волна, как и в интерферометре Фабри-Перо, испытывает многократные отражения от зеркальных поверхностей  $M_1$  и  $M_2$ , вследствие этого возникают лучи  $1, 2, 3, 4$ , которые, интерферируя между собой, дают в проходящем свете распределение интенсивности с резкими полосами пропускания (рис. 7). Основное отличие интерференционного светофильтра от интерферометра Фабри-Перо заключается в том, что в эталоне Фабри-Перо в основе теории лежит угловая зависимость интенсивности при постоянной длине волны  $\lambda$ , а в интерференционном светофильтре, наоборот, зависимость

интенсивности от длины волны при постоянном угле падения.

Выражения для распределения интенсивности в спектре пропускания, интенсивности в максимуме полосы пропускания для разности хода и полной разности фаз совершенно аналогичны соответствующим выражениям для стеклянного интерферометра Фабри-Перо (см. работу № 9 в [1]).

Основные характеристики интерференционного светофильтра следующие\*.

\* В формулах (9 — 18) приняты обозначения:  $R$  — коэффициент отражения зеркал;  $\theta$  — пропускание зеркальных слоев интерферометра;  $\delta_1, \delta_2$  — скачки фаз на отражающих поверхностях;  $\alpha$  — угол падения;  $\beta$  — угол выхода света;  $t$  — толщина промежуточного слоя;  $n$  — показатель преломления промежуточного слоя между зеркалами;  $\tau$  — прозрачность промежуточного слоя,  $m$  — порядок интерференции.

1. Коэффициент пропускания в максимуме рабочей полосы (прозрачность)

$$T_{\max} = \frac{\tau \theta^2}{(1 - \tau R)^2}, \quad (9)$$

откуда видно, что для увеличения пропускания необходимо увеличивать  $\theta$  и  $R$ .

2. Длина волны, соответствующая максимуму полосы пропускания,

$$\lambda_{\max} = \frac{2nt \cos \beta}{k - \frac{\delta_1 + \delta_2}{2\pi}}, \quad (10)$$

Из формулы видно, что положение спектральной полосы пропускания зависит от угла наклона падающего света. Этим пользуются для небольшого смещения полосы пропускания фильтра в коротковолновую сторону. Однако следует иметь в виду, что тогда растет ширина полосы пропускания. Кроме того, при больших наклонах полосы расщепляются на составляющие  $s$  и  $p$  вследствие различия в фазовых сдвигах при отражении компонент, поляризованных в плоскости падения и нормально к ней (рис. 8). Расщепление может достигать нескольких десятков миллимикрон. В некоторых случаях это оказывается полезным, так как позволяет получить монохроматическое линейно-поляризованное излучение. Наличие металлических слоев в интерференционном светофильтре практически не влияет на степень поляризации, так как отношение осей эллипса в среднем не превышает 0,03.

3. Ширина полосы пропускания, определяемая выражением

$$2\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2t\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda^2}{\pi} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \lambda}} \cdot \frac{1 - \tau R}{\pi \sqrt{\tau R}}. \quad (11)$$

При выводе формулы учтено, что величина  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $m$  и  $\tau$  считаются постоянными, а изменяется только длина волны  $\lambda$ .

Если  $\frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \lambda} \ll m$ , то формула для ширины полосы пропускания примет вид

$$2\delta\lambda = \frac{\lambda}{m} \cdot \frac{1}{N_{эф}}, \quad (12)$$

где  $N_{эф} = \frac{\pi \sqrt{\tau R}}{1 - \tau R}$ . Иногда вместо полной полуширины  $2\delta\lambda$  пользуются шириной спектрального интервала, на границах которого пропускание уменьшается в 10 раз. Такая ширина превосходит полную полуширину  $2\delta\lambda$  в 2–3 раза.

4. Фактор контрастности. Характерной особенностью интерференционного светофильтра является наличие далеко простирающихся слабоинтенсивных широких крыльев, уменьшающих чистоту спектра (пропускаемого светофильтром светового потока) и создающих общий довольно сильный фон. Интегральное пропускание интерференционного фильтра в пределах полосы пропускания (три ширины) составляет лишь 80 % от полного интегрального пропускания независимо от свойств покрытий. Остальные 20 % приходятся на фон. Для оценки чистоты спектра вводится фактор контрастности  $C$ . Эта величина для интерференционного светофильтра характеризуется выражением

$$C = \left( \frac{1 + \tau R}{1 - \tau R} \right)^2. \quad (13)$$



Здесь учтено, что минимальная интенсивность крыльев определяется соотношением

$$I_{\min}^D = I_{\max}^D \left( \frac{1 - \tau R}{1 + \tau R} \right)^2. \quad (14)$$

Величина, обратная величине  $c$ , равна относительной величине коэффициента пропускания в крыльях максимума полосы пропускания.

5. *Угловая апертура пучка.* Положение максимума полосы пропускания зависит от угла падения, что ограничивает угловую апертуру фильтруемых световых пучков, которая не должна превышать

$$2\alpha = 2n \sqrt{\frac{2\delta\lambda}{\lambda}} \quad (15)$$

Например, при  $n = 5,1$  для  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$  допускаемая угловая апертура пучка  $2\alpha \sim 4^\circ$ , если несущественно смещение полосы пропускания на  $1 \text{ \AA}$ . Таким образом, требования к точности установки интерференционного фильтра и коллимации пучка не очень жесткие.

6. *Расстояние между соседними полосами пропускания*

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda\lambda'}{2t\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}, \quad (16)$$

где  $\lambda$  и  $\lambda'$  — длины волн, соответствующие условию максимума  $m$ -го и  $(m+1)$ -го порядка интерференции, определяемые условиями

$$2t\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = m\lambda - \frac{\lambda}{2\pi}(\delta_1 + \delta_2);$$

$$2t\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = (m+1)\lambda' - \frac{\lambda'}{2\pi}(\delta_1 + \delta_2).$$

Если спектральный интервал между полосами пропускания невелик, то произведение  $\lambda\lambda'$  можно заменить на  $\lambda^2$ . Тогда в случае нормального падения допустимо пользоваться формулой

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nt}. \quad (17)$$

Порядок  $m$  интерференционного светофильтра находится по формуле

$$m = \frac{1}{\lambda} 2t\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}. \quad (18)$$

Фильтры с относительно небольшим значением  $m$  называются светофильтрами *низкого порядка*. При больших значениях  $m$  фильтры называются светофильтрами *высокого порядка*. Таким образом, если оптическая толщина фильтра равна  $\Delta$ , то имеется ряд полос пропускания, длины волн максимумов которых составляют соответственно

$$\lambda_{\max 1} = \frac{2\Delta}{1}, \lambda_{\max 2} = \frac{\lambda_{\max 1}}{2} = \frac{2\Delta}{2}, \dots, \lambda_{\max m} = \frac{\lambda_{\max 1}}{m} = \frac{2\Delta}{m}$$

Фильтры, предназначенные для выделения первой, наиболее длинноволновой полосы пропускания, называются фильтрами первого порядка. Они имеют оптическую толщину  $\Delta = \lambda/2$  и нуждаются в подавлении лишь коротковолновых максимумов пропускания с длинами волн  $\lambda_{\max 2} = \lambda/2$ ,  $\lambda_{\max 3} = \lambda/3$  и т.д. Обычно это

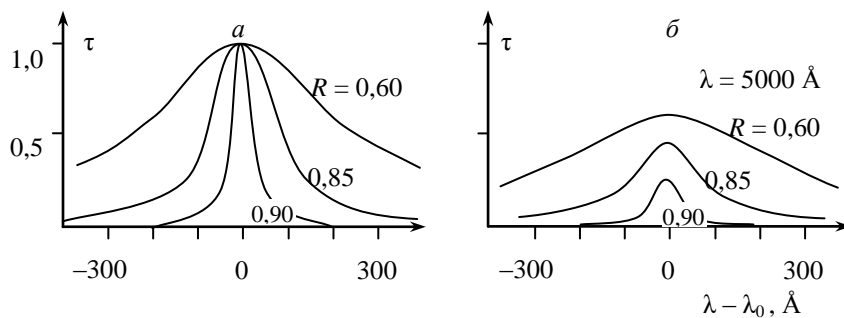


Рис. 9. Форма полосы пропускания интерференционного фильтра.  
*a* – теоретическая без учета поглощения;  
*б* – для реальных фильтров с серебряными зеркалами.

легко осуществляется либо специальными абсорбционными фильтрами, либо поглощением материала подложки самого фильтра. Так, стеклянный фильтр первого порядка, рассчитанный на длину волны короче  $6000 \text{ \AA}$ , не нуждается в специальном поглощении коротковолновых максимумов, так как все они имеют длину волны меньше  $3000 \text{ \AA}$  и поглощаются стеклом. Фильтр второго порядка имеет оптическую толщину  $\Delta = \lambda$  и нуждается в подавлении одной полосы пропускания с длинноволновой стороны спектра ( $\lambda_{\text{max } 1} = 2\lambda$ ) и в коротковолновом участке ( $\lambda_{\text{max } 3} = 2\lambda/3$ ); ( $\lambda_{\text{max } 4} = 2\lambda/4$ ). Низкие порядки интерференции обуславливают сравнительно большую ширину полос пропускания.

Металлические полупрозрачные слои обладают заметным поглощением, что существенно сказывается на величине максимума и ширине полосы пропускания светофильтра (рис. 9). Уменьшение пропускания в максимуме для слоев с высоким коэффициентом отражения обусловлено увеличением поглощения в слое. Применение многослойных диэлектрических слоев вместо отражающих металлических покрытий позволяет резко увеличить коэффициент отражения зеркал, уменьшить поглощение и тем самым увеличить максимум пропускания. Подобным способом можно получить фильтр с шириной полосы пропускания  $10\text{--}50 \text{ \AA}$  и меньше и с максимальным пропусканием порядка 70 %. Составляя мультиплекс-фильтры, можно значительно увеличить фильтрующую способность. При этом ширина полосы нежелательных добавочных максимумов достигается фильтром низкого порядка. Часто такие сложные фильтры изготавливаются на одной подложке из цветного стекла с комбинацией отражающих и промежуточных слоев. Следует отметить, что необходимость отделить побочные максимумы затрудняет получение интерференционных светофильтров с очень малой шириной полосы пропускания. Промышленность изготавливает интерференционные светофильтры, имеющие полуширину полос пропускания до нескольких ангстрем при пропускании в максимуме в десятки процентов. Фильтры выпускаются для областей спектра от ближнего ультрафиолета до инфракрасной области.

Изготавливаются светофильтры и с подложкой из прозрачной слюды. В этом случае из-за различия главных показателей преломления  $n_o$  и  $n_e$  обыкновенного и необыкновенного лучей в спектре каждого порядка максимумы для каждого луча сдвигаются, и наблюдаемые полосы пропускания раздваиваются (рис. 10). Экспериментальное определение разности длин волн  $\delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ , соответствующих максимумам полос пропускания в спектре  $m$ -го порядка, позволяет найти разность показателей преломления двоякопреломляющего вещества по формуле

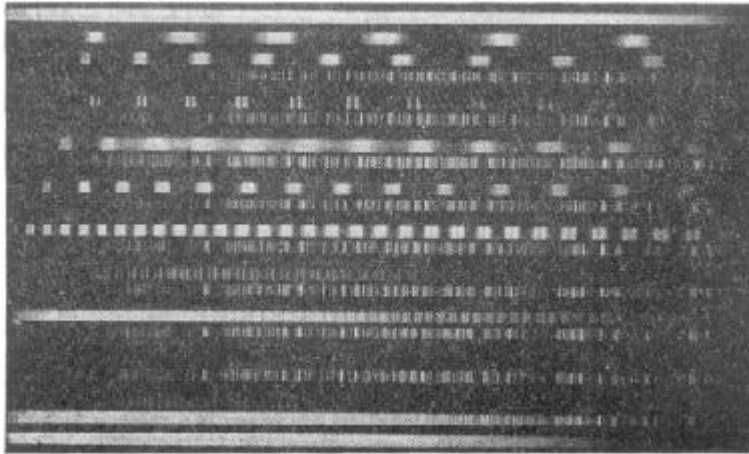


Рис. 10. Спектры пропускания светофильтров со слюдяной прослойкой различной толщины.

$$\delta n = n_o - n_e = \frac{m - 1}{2t} \delta \lambda_m \quad (19)$$

и исследовать зависимость этой разности от длины волны.

Заметим, что спектр излучения отраженного фильтром света приблизительно дополняет спектр проходящего излучения, поэтому в ряде спектроскопических задач создание как бы искусственной линии поглощения может оказаться полезным, например, для ослабления излучения линии, используемой для оптической накачки, возбуждения комбинационного рассеяния или фотолюминесценции — это так называемые отражательные интерференционные фильтры.

Существуют также интерференционные светофильтры с использованием эффекта внутреннего отражения. При таком отражении световая волна частично проникает во вторую (менее плотную) среду. Если эта среда представляет собой тонкую (толщиной несколько длин волн) прослойку между средами с высоким показателем преломления, то она может играть роль светоделительного покрытия, коэффициент отражения и пропускания которого зависит от толщины (рис. 11). Такая прослойка практически не поглощает света, что значительно увеличивает пропускание построенных с ее помощью интерференционных светофильтров. Интерференционные светофильтры полного внутреннего отражения выполняются по приведенной схеме (см. рис. 11). Фильтры такого типа делаются, например, из стекла или хлористого натрия. В качестве диэлектрического слоя используются пленки

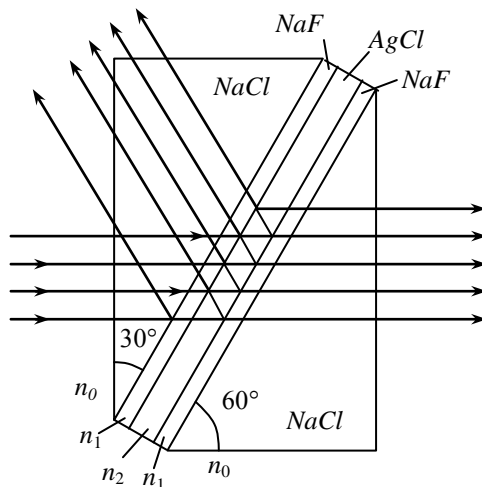


Рис. 11. Интерференционный фильтр с использованием полного внутреннего отражения.

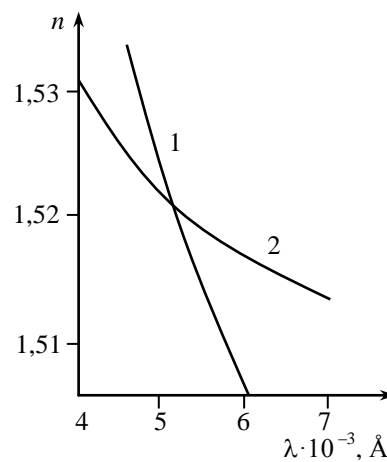


Рис. 12. Дисперсионные кривые компонент (1, 2) фильтра Христиансена.

$AgCl$ , расположенные между двумя тонкими прозрачными пленками из  $NaF$ . Эти пленки обладают малым показателем преломления по сравнению с показателем преломления призм  $NaCl$  и диэлектрического слоя  $AgCl$ . Фильтры такого типа, построенные для видимой области, имеют пропускание в максимуме, достигающее до 90%. Полуширина полосы пропускания может быть порядка 50–10 Å, что делает подобные светофильтры близкими к призмному монохроматору. Их недостаток — расщепление полосы пропускания на две компоненты, сдвинутые по спектру, как и для любого интерференционного фильтра при наклонном падении света.

**Дисперсионные светофильтры.** Такой светофильтр основан на дисперсии света — зависимости показателя преломления от длины волны — и представляет собой кювету, наполненную порошком из прозрачного материала. В кювету заливается жидкость, зависимость показателя преломления которой от длины волны подобрана так, чтобы показатели преломления жидкости (1) и порошка (2) совпадали лишь для определенной длины волны (рис. 12). Тогда кювета оптически однородна для лучей света этой длины волны, но рассеивает излучение других длин волн, лежащих по обе стороны от заданной. Для успешного выделения узкой полосы пропускания необходимо, чтобы наклоны кривых дисперсии жидкости и порошка различались как можно больше. Угловая расходимость фильтруемого пучка света должна быть небольшой, так как на приемник падает рассеянное фильтром излучение других длин волн, создавая значительный фон. Прозрачность таких фильтров может достигать 80%. Полуширина полосы пропускания 20–100 Å. Длина волны максимума пропускания может смещаться как вследствие изменения температуры, так и в результате добавления другой компоненты. В обоих случаях изменяются показатели преломления жидкости и порошка.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Цель работы:** ознакомиться с действием основных типов светофильтров, экспериментально определить их основные параметры.

**Приборы и принадлежности:** набор светофильтров, спектрофотометр СФ-46.

### Задания к работе:

1. Определить основные параметры (спектральную ширину полосы пропускания  $2\delta\lambda$ , длину волны в максимуме полосы пропускания  $\lambda_{\text{max}}$ , фактор контрастности светофильтра  $C$ ) абсорбционного светофильтра.
2. Определить основные параметры отражательного светофильтра.
3. Определить основные параметры интерференционного светофильтра.

### Порядок выполнения работы:

1. Внимательно ознакомиться с принципом действия и устройством спектрофотометра СФ-46 по его заводскому описанию.
2. Начертить оптическую схему прибора СФ-46 и выписать его основные технические характеристики.
3. Ознакомиться с методикой определения величин пропускания и оптической плотности на спектрофотометре СФ-46.
4. На упаковке для фильтров указана длина волны  $\lambda_i$ , вблизи которой светофильтр имеет максимум пропускания. Снять значения пропускания  $\tau$  для абсорбционного светофильтра через 10 нм в диапазоне длин волн от  $\lambda_i - 100$  нм до  $\lambda_i + 100$  нм. В области от  $\lambda_i - 10$  нм до  $\lambda_i + 10$  нм производить измерения через 2 нм.
5. Снять значения пропускания  $\tau$  для интерференционного светофильтра через 5 нм в диапазоне длин волн от  $\lambda_i - 50$  нм до  $\lambda_i + 50$  нм. В области от  $\lambda_i - 10$  нм до  $\lambda_i + 10$  нм производить измерения через 1 нм.
6. Снять значения пропускания  $\tau$  для отражательного светофильтра через 10 нм в диапазоне длин волн от  $\lambda_i - 100$  нм до  $\lambda_i + 100$  нм. В области от  $\lambda_i - 10$  нм до  $\lambda_i + 10$  нм производить измерения через 1 нм.
7. Построить кривые пропускания  $\tau = \tau(\lambda)$  для всех светофильтров.
8. По полученным кривым определить для каждого светофильтра точные значения длин волн максимумов полос пропускания, ширину полосы и фактор контрастности.

### Литература:

1. Оптика и атомная физика. Лаб. практ. по физике. Под ред. Р.И. Солоухина. Новосибирск, 1976 г.
2. Оптика. Г.М. Ландсберг. М., 1976.
3. Оптика. Н.М. Годжаев. М., 1977.