

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. Ломоносова

Физический факультет

кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

**Методическая разработка
по общему физическому практикуму**

Лаб. работа № 78

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ
НЕМОНОХРОМАТИЧНОСТИ
СВЕТА НА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННУЮ
КАРТИНУ**

Работу поставил доцент Авксентьев Ю.И.

Москва 2012 г.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕМОНОХРОМАТИЧНОСТИ СВЕТА НА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННУЮ КАРТИНУ

Целью настоящей работы является изучение влияния немонохроматичности источника света на интерференционную картину, измерение длины волны и ширины полосы пропускания светофильтра и определение наибольшего порядка интерференционного минимума в интерференционной картине.

1. Рабочая формула

Для получения монохроматического пучка света в работе используется интерференционный светофильтр, выделяющий из сплошного спектра источника узкую полосу длин волн. Как показано в § 22 пособия «Электромагнетизм и волновая оптика», немонохроматичность света в пучке приводит к уменьшению контрастности интерференционных линий, при этом контрастность линий тем меньше, чем больше порядок интерференции m . При больших порядках контрастность становится столь малой, что интерференционная картина становится ненаблюдаемой. Связь между $\Delta\lambda$ и наибольшим порядком m интерференционного максимума дается формулой

$$m = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \dots, \quad (1)$$

где $\Delta\lambda$ — ширина спектрального интервала света в пучке, а λ — средняя длина волны этого интервала. Формула (1) может быть использована и для вычисления наибольшего порядка интерференционного минимума. При больших значениях m ($m = 100$) погрешность таких вычислений будет мала.

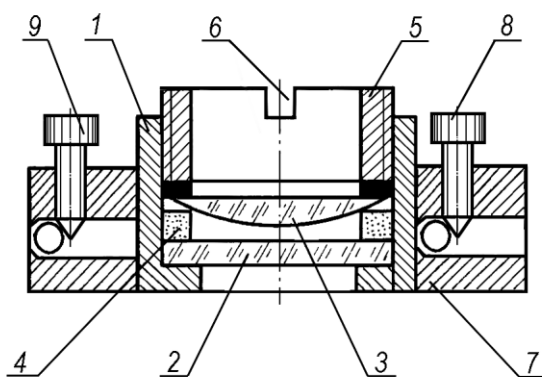


Рис. 1

2. Описание установки

Устройство установки можно изучить, прочитав раздел *описание установки* методического пособия к задаче № 77. Так как при выполнении настоящей работы радиусы колец Ньютона не измеряются, то чтение той части пособия, в которой описывается устройство окулярного микрометра, может носить ознакомительный характер. В дополнение к изложенному в этом разделе, следует сказать несколько слов о конструкции оправки, в которой размещается

стеклянная пластинка с линзой и способа ее крепления на предметном столике микроскопа. Оправка 1 имеет вид цилиндра (рис.1). С одного конца на внутренней поверхности цилиндра нарезана резьба. Проходное отверстие цилиндра на другом конце имеет диаметр, меньший, чем внутренний диаметр самого цилиндра. Внутри цилиндра на бортик укладывается стеклянная пластинка 2, имеющая форму диска. На нее выпуклой стороной накладывается стеклянная линза 3. Между линзой и стеклянной пластинкой помещается упругая кольцевая прокладка 4. К кольцевой прокладке линза прижимается круглой гайкой 5 с наружной резьбой, перемещающейся по внутренней резьбе оправки. Гайка вращается ключом специальной формы 10 (рис.2), который вставляется в прорези 6, сделанные на наружной части гайки. Вращая гайку, можно изменять расстояние между линзой и стеклянной пластинкой. При открученной гайке линза не касается

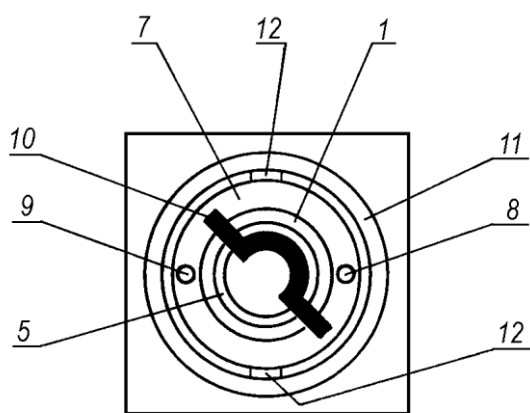


Рис. 2

стеклянной пластинки. Для фиксирования оправки на предметном столике микроскопа служит кольцо 7 с двумя винтами 8 и 9, с помощью которых устраняется подвижность оправки и кольца на предметном столике микроскопа. Принцип работы фиксаторов понятен из рисунка. Винты 8 и 9 вывинчивать следует ровно настолько, чтобы под давлением пальца шарики поочередно ушли вглубь кольца и не выступали над его боковыми поверхностями. Чрезмерное вывинчивание этих винтов может

привести к потере шариков. Закручивание винта 8 фиксирует оправку с линзой в кольце, закручивание винта 9 фиксирует кольцо с оправкой на предметном столике микроскопа.^{1*} При закручивании винтов не следует прилагать чрезмерно больших усилий. Размещение кольца с оправкой на предметном столике микроскопа 11 показано на рис.2 (вид сверху).

3. Подготовка установки к работе

а) Убедиться в том, что шарики под винтами 8, 9 не выступают над боковой поверхностью переходного кольца 7. Если это не так, то нажимая поочередно пальцем на каждый шарик и вращая соответствующий винт, утопить шарики полностью в радиальных каналах.

б) Положить кольцо на ровную поверхность лабораторного стола, наложить на внутреннее отверстие кольца оправку с линзой и равномерным усилием двух пальцев опустить ее до поверхности стола. При этом

¹ Головка винта (8) отмечена белой точкой.

необходимо избегать перекосов и заклинивания. Винтом 8 зафиксировать оправку в кольце.

в) Перенести кольцо с оправкой на предметный столик микроскопа и повернуть его таким образом, чтобы винт 9 не совпадал с прорезями 12 на предметном столике микроскопа (рис.2). Вставить в прорези гайки ключа 10. Далее выполнить действия, описанные в п.п. (б-и) раздела **подготовка установки к работе** в методическом пособии (м.п.) к задаче № 77.

г) Так как центр интерференционной картины не совпадает с центром поля зрения объектива, то рассматривая интерференционную картину через окулярный микрометр, повернуть окулярный микрометр так, чтобы центр перекрестия можно было бы установить на первое или второе интерференционное кольцо. Если в направлении радиуса, проходящего через центр перекрестия, интерференционные кольца в некотором месте искажены из-за дефектов стеклянной пластинки или линзы, то вращением кольца в предметном столике убрать дефектные места с этого направления. Винтом 9 зафиксировать кольцо на предметном столике.

4. Проведение измерений

Измерение максимального порядка интерференционного минимума

а) Установить центр перекрестия окулярного микрометра на 1-й или 2-й интерференционный минимум ($m_0 = 1$ или 2).

б) Продолжая наблюдение интерференционной картины, указательным и большим пальцами правой и левой руки медленно начать вращать ключом гайку против часовой стрелки. Интерференционные кольца, уменьшаясь в диаметре, начнут стягиваться к центру. Измерение состоит в подсчете числа темных интерференционных колец, прошедших через центр перекрестия. До начала подсчета числа колец потренируйте пальцы рук, вращающие ключ. Необходимо добиться медленного и равномерного перемещения интерференционных колец в поле зрения окулярного микрометра. Приостановка и возобновление вращения гайки не должны приводить к сбою в подсчете числа колец. С увеличением порядка интерференционного кольца m контрастность интерференционной картины в соответствии с теорией уменьшается, так что кольца с $m_1 > 50$ становятся трудноразличимыми. Поэтому при больших m не рекомендуется прерывать наблюдение и подсчет числа темных колец, проходящих через центр перекрестия. Подсчет m_1 производить до полного исчезновения интерференционной картины. В тетрадь записать наибольший порядок интерференционного минимума $m_{\text{изм}}$.

$$m_{\text{изм}} = m_0 + m_1 \quad .$$

Измерение $m_{\text{изм}}$ произвести три раза. В отчете представить среднее значение $m_{\text{изм}}$.

Измерение длины волны и ширины полосы пропускания светофильтра

Для этих измерений используется малогабаритный универсальный монохроматор (МУМ). Описание устройства монохроматора см. в разделе **измерение длины волны пропускания светофильтра** в методическом пособии к задаче №77. Подготовка монохроматора к измерениям, включение монохроматора и проведение измерений см. в соответствующих разделах того же описания. В разделе **проведение измерений** выполнить указания, содержащиеся в п.п. «а–г». Далее:

а) В целях сокращения времени измерения поиск длины волны пропускания светофильтра (λ_{np}) рекомендуется начинать для

- красного светофильтра с $\lambda = 600,0$ нм,
- оранжевого светофильтра с $\lambda = 500,0$ нм,
- зеленого светофильтра с $\lambda = 450,0$ нм,
- голубого светофильтра с $\lambda = 400,0$ нм.

Установить на механическом счетчике длину волны, соответствующую цвету используемого светофильтра. Рукоятками установки нуля 3 и 2 (рис.8 в метод.разраб. к задаче № 77) установить на индикаторе цифрового вольтметра напряжение $+ 0,500$ В. Так как длина волны, установленная на счетчике, далека от длины волны пропускания светофильтра, то напряжение U на индикаторе цифрового вольтметра можно считать соответствующим интенсивности фона светового потока $U=U_{фона}$. Записать $U_{фона}$ в таблицу данных.

б) Вращая рукоятку счетчика «Длина волны» на корпусе монохроматора в сторону увеличения длины волны, найти длину волны λ , при которой показание цифрового вольтметра U станет максимальным, $U = U_{np}$. Найденная таким образом длина волны есть длина волны пропускания светофильтра, $\lambda = \lambda_{np}$. Измерения λ_{np} провести три раза. Результаты записать в таблицу данных вместе с соответствующими им показаниями цифрового вольтметра U_{np} . После первого измерения диапазон поиска можно сократить до ± 10 нм относительно найденной λ_{np} . По данным измерений вычислить среднее значение λ_{np} и U_{np} . Результаты вычислений занести в таблицу данных.

Таблица

№	λ_{np} (нм)	U_{np} (В)	$U_{фона}$ (В)	$\bar{\lambda}_{np}$ (нм)	\bar{U}_{np} (В)
1					
2					
3					

Полосу пропускания светофильтра измерить на уровне $0.5I_{max}$ ($0.5U_{np}$) .
Для этого:

в) Вычислить

$$\Delta U = (\bar{U}_{np} - U_{фона}) / 2$$

и напряжение

$$U_{1,2} = U_{np} - \Delta U .$$

г) На счетчике «Длина волны» установить длину волны $\bar{\lambda}_{np}$.

д) Уменьшая показания счетчика «Длина волны», найти длину волны λ_1 , при которой показание цифрового вольтметра станет равным

$$U_1 = \bar{U}_{np} - \Delta U .$$

Записать значение λ_1 в тетрадь.

е) Увеличивая показания счетчика «Длина волны», найти длину волны, при которой показание цифрового вольтметра вновь станет равным

$$U_2 = \bar{U}_{np} - \Delta U = U_1 .$$

Записать значение λ_2 в тетрадь.

ж) Вычислить полосу пропускания светофильтра $\Delta\lambda_{с.ф.}$.

$$\Delta\lambda_{с.ф.} = \lambda_2 - \lambda_1 .$$

з) По формуле (1) вычислить наибольший порядок минимума в интерференционной картине

$$m_{выч} = \frac{\bar{\lambda}_{np}}{\Delta\lambda_{с.ф.}} .$$

Сравнить вычисленное значение $m_{выч}$ с измеренным $m_{изм}$.

При отчете представить заполненную таблицу данных, $m_{изм}$, $m_{выч}$ с указанием погрешности их измерений.

Приложение к задаче № 78

Принцип работы и оптическая схема интерференционного светофильтра

Рассмотрим вначале явления, происходящие при падении монохроматического пучка света с длиной волны λ на поверхность хорошо отполированной плоскопараллельной стеклянной пластинки толщиной h . Пусть i - угол падения на эту пластинку некоторого луча из этого пучка (рис. 3а). Этот луч частично отразится от поверхности пластинки (луч I), а частично пройдет внутрь нее, преломившись под углом r на этой поверхности. Последующие процессы преломления и отражения луча, прошедшего вглубь пластинки, приведут к образованию лучей 2, 3, 4, ... и I' ,

$2', 3', 4', \dots$ Процессы отражения и пропускания света на границе двух сред принято характеризовать коэффициентами отражения R и пропускания T . При этом R равен отношению среднего потока энергии отраженной волны к среднему потоку энергии падающей волны, T - отношению среднего потока энергии прошедшей волны к тому же среднему потоку энергии падающей волны. Если поглощение в пластинке отсутствует, то $R+T=1$.

Совершенно очевидно, что интенсивности многократно отраженных и преломленных лучей будут уменьшаться при каждом отражении и

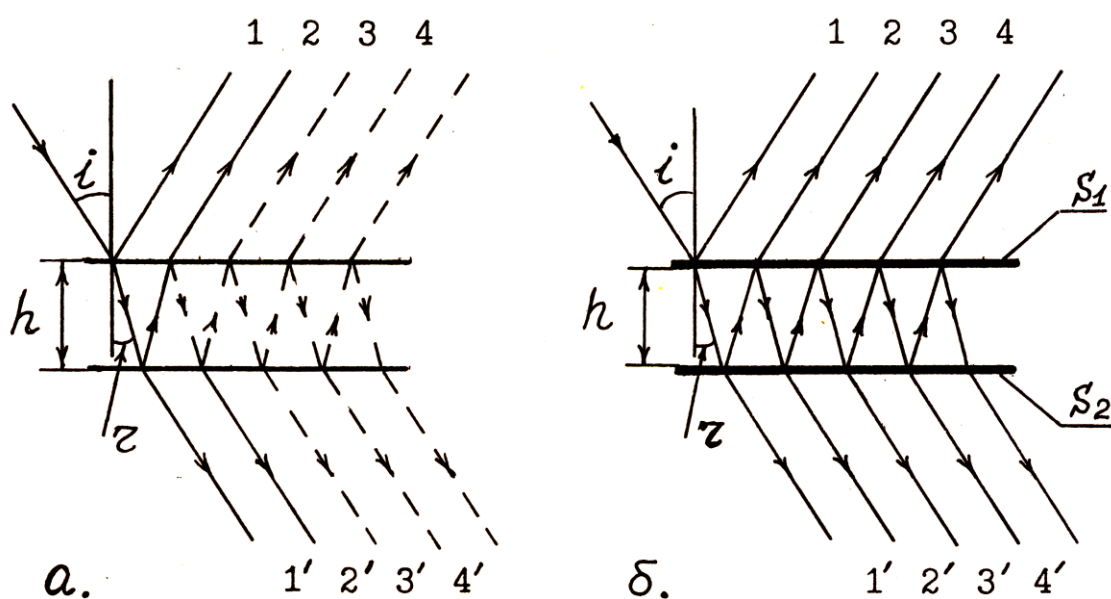


Рис. 3

преломлении. Так для свободной стеклянной поверхности при малых углах падения i $R=0.05$ и $T=0.95$, т.е. только 5% падающего света отражается, а 95% - проходит, то интенсивности лучей $3, 4, \dots$ и $3', 4', \dots$ оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с интенсивностями лучей $1, 2$ и $1', 2'$. Таким образом при расчете интерференционной картины в проходящем и отраженном свете принимать во внимание необходимо только эти два луча (1 и 2 или $1'$ и $2'$). Интерференция, при расчете которой во внимание принимают только два луча, а вкладами от остальных лучей пренебрегают, получила название двухлучевой интерференции.*²⁾ Как показано в рекомендованном пособии [1], формула (23.2), оптическая разность хода между отраженными лучами 1 и 2 равна

$$\Delta = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}. \quad (1.1)$$

*²⁾ Кольца Ньютона, изучаемые в данной задаче, могут служить примером двухлучевой интерференции.

Слагаемое $\frac{\lambda}{2}$ в (1.1) появляется вследствие учета дополнительной разности хода, возникающей при отражении луча I от оптически более плотной

среды. При малых углах падения луча i формула (1.1) принимает вид

$$\Delta = 2nh + \frac{\lambda}{2}. \quad (1.2)$$

Условие образования интерференционных минимумов при отражении имеет вид

$$\Delta = 2nh + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (1.3)$$

т.е. оптическая разность хода равна нечетному числу полуволен. Или

$$2nh = m\lambda. \quad (1.4)$$

Выражение для Δ' между лучами I' и $2'$, прошедшими через стеклянную пластинку, легко получить из формулы (1.2). Так как ни луч I' , ни луч $2'$ на своем пути не испытывают отражения от оптически более плотной среды, то для них

$$\Delta' = 2nh. \quad (1.5)$$

Поэтому условием образования интерференционных максимумов для лучей, прошедших через пластинку, будет

$$2nh = m\lambda, \quad (1.6)$$

т.е. Δ' равна четному числу полуволен или целому числу волн.

Сравнивая формулы (1.4) и (1.6) можно прийти к выводу, что интерференционные картины в отраженном и проходящем свете в отношении расположения максимумов и минимумов будут взаимно дополнительными, т.е. если толщина стеклянной пластинки nh такова, что для световой волны длины λ в отраженном свете наблюдается интерференционный минимум порядка m , то в проходящем свете будет наблюдаться интерференционный максимум того же порядка. Графическое изображение распределения интенсивности света в проходящем I^T и отраженном I^R свете представлено на рис. 4а. Как видно из рисунка, переход от максимума к минимуму как в отраженном, так и в проходящем свете происходит плавно, без резких границ. Представленное на рис. 4а распределение интенсивности возникает при рассмотрении процессов отражения и преломления одного из лучей из падающего потока. Вклад остальных лучей в интерференционную картину приведет к увеличению интенсивности света в максимумах, но не изменит ее углового распределения (зависимости I от m).

Иное распределение интенсивности света в интерференционной картине получается, если обе поверхности плоскопараллельной стеклянной пластинки покрыть полупрозрачным слоем серебра S_1 и S_2 (см. рис. 3б). Такой слой отражает до 90% света ($R=0.9$) и при расчете интерференционной картины нельзя пренебрегать лучами $3, 4 \dots$ и $3', 4' \dots$. Интерференция, при которой во внимание принимается N

интерферирующих лучей (при i близких к нулю $N \rightarrow \infty$), носит название многолучевой интерференции. Распределение интенсивности в интерференционной картине в проходящем свете описывается формулой Эйри.

$$I^T = \frac{T^2}{(I - R^2) + 4R \sin^2 2\pi(nh/\lambda)}, \quad (1.7)$$

где R и T коэффициенты отражения и пропускания высокоотражающих покрытий, λ - длина волны падающего излучения. Из формулы (1.7)

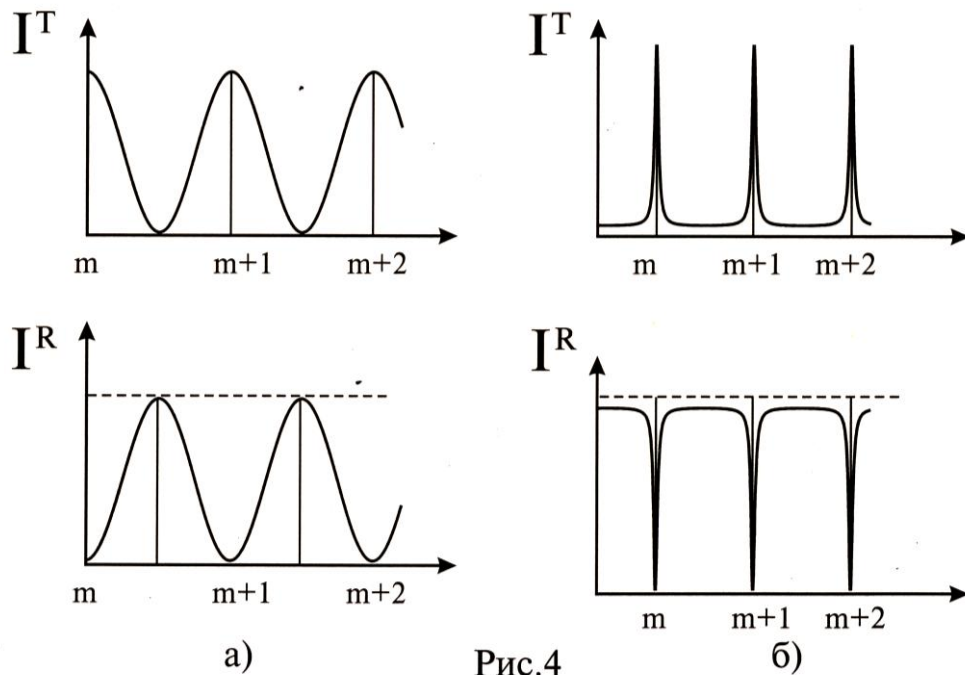


Рис.4

следует, что интенсивность I^T достигает максимального значения при

$$\sin^2 2\pi \frac{nh}{\lambda} = 0,$$

т.е. максимумы соответствуют длине волны λ_0 , удовлетворяющей условию

$$2\pi \frac{nh}{\lambda_0} = m\pi,$$

или

$$\lambda_0 = \frac{2nh}{m}. \quad (1.8)$$

Зависимости интенсивности I в проходящем I^T и отраженном I^R свете от m представлены на рис. 4б. Вклад других лучей пучка в интерференционную картину, так же как и в предыдущем случае (пластинка не покрытая серебром), приведет к увеличению интенсивности света в максимумах, но не изменит ее углового распределения. Зависимости I от

m на рис. 4б существенно отличаются от аналогичных зависимостей на рис. 4а. Распределение интенсивности на рис. 4б представляет собой ряд резких максимумов, разделенных широкими минимумами. При $R=0.9$ расстояние между соседними максимумами, примерно, в 30 раз больше ширины каждого из них. При отсутствии поглощения в отражающих слоях интерференционная картина в отраженном свете будет дополнительной к картине в проходящем свете. Из формулы (1.8) следует, что хорошо отполированная плоскопараллельная стеклянная пластинка, покрытая с двух сторон тонким полупрозрачным слоем серебра, при освещении ее монохроматическим светом обладает способностью селективно повышать пропускание света с длинами волн $\lambda = m\lambda_0$, уменьшая при этом до нуля интенсивность отраженного света для тех же длин волн. Пластинка с такими свойствами представляет собой прообраз светофильтра, получившего название интерференционного светофильтра. Для того чтобы такая пластинка стала светофильтром, необходимо ограничить спектр пропускаемых ею длин волн одной длиной λ_0 . Добиться этого можно путем уменьшения толщины стеклянной пластинки. Уменьшение толщины h ведет к взаимному раздвижению интерференционных максимумов. Если пластинка имеет оптическую толщину nh порядка длины волны ($m=1,2$ в формуле (1.8)), то число интерференционных максимумов, сохраняющихся в видимой области спектра, становится незначительным, а сами они будут максимально широко разнесены по длинам волн. При такой структуре спектра все побочные максимумы можно убрать поглощающими абсорбционными фильтрами (цветное стекло, окрашенные желатиновые пленки и т. д.). Таким образом можно добиться того, что в видимой области спектра останется только один максимум, соответствующий длине волны λ_0 , а сама пластинка превратится в интерференционный светофильтр со сравнительно узкой полосой пропускания. Порядок интерференции m в этом случае носит название порядка фильтра. На рис. 5 приведена спектральная кривая коэффициента светопропускания T интерференционного светофильтра.

Основными характеристиками светофильтра являются:

- а) длина волны пропускания - λ_{np} ;
- б) величина коэффициента пропускания в максимуме - T_{max} ;
- в) ширина полосы пропускания $\Delta\lambda_{0.5}$, измеренная на уровне $0.5T_{max}$.

Изготавливают интерференционный фильтр следующим образом. Одна из сторон хорошо отполированной стеклянной пластинки P_1 (рис. 6), площадью в несколько квадратных сантиметров, испарением в вакууме последовательно покрывается полупрозрачной пленкой серебра S_1 , диэлектрической пленкой D и вторым полупрозрачным слоем серебра S_2 . Затем для защиты от механических повреждений слой серебра S_2 закрывается второй стеклянной пластинкой P_2 . Оптическую толщину nh

диэлектрической пленки D выбирают такой, чтобы она удовлетворяла соотношению

$$nh = m \frac{\lambda_{np}}{2}$$

при малых значениях m ($m=1,2$). Поглощающий абсорбционный фильтр на рис. 6 не показан. По степени монохроматизации света интерференционные светофильтры занимают промежуточное положение между монохроматорами и абсорбционными светофильтрами. Ширина полосы пропускания интерференционных светофильтров в видимом диапазоне длин волн варьируется от 1Å до нескольких десятков ангстрем, в то время как у

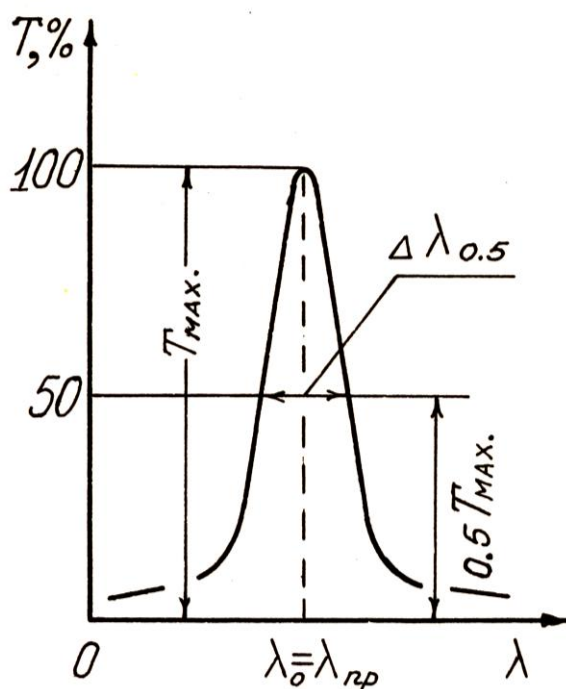


Рис. 5

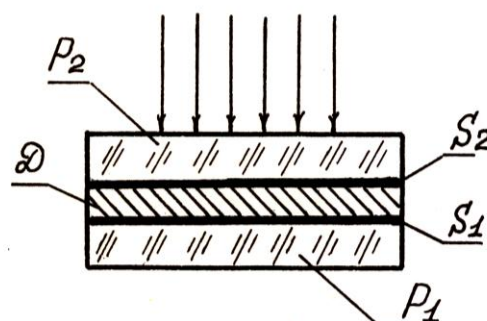


Рис. 6

абсорбционных фильтров она составляет, примерно, 500Å . Другим преимуществом интерференционных фильтров перед абсорбционными является то, что выделение столь узкой спектральной полосы пропускания происходит со значительно меньшими потерями света внутри них. Так например, коэффициент пропускания T интерференционных фильтров может достигать 90% . Столь высокие значения T удается получить при замене серебряных зеркал фильтров многослойными диэлектрическими покрытиями – диэлектрическими зеркалами. Создание таких зеркал является еще одним примером успешного применения на практике явления интерференции. Диэлектрические зеркала могут отражать 99% и более падающего излучения и в отличие от металлических зеркал они не поглощают электромагнитную энергию световой волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Д.В. “Электромагнетизм и волновая оптика” изд. МГУ, 1994. Часть II, гл. I, §§16–20, 23.
2. Савельев И.В. «Курс общей физики». Учебное пособие в 5-и книгах. Кн. 4. «Волновая оптика». М. Наука. Физматгиз 1998 г.
Ч. II Оптика.
Гл. 4 Интерференция света.
4.1 - Интерференция световых волн ... стр. 93.
4.2 - Когерентность. ... стр. 99.
4.3 - Способы наблюдения интерференции света ... стр. 108.
4.4 – Интерференция света при отражении от тонких пластинок ... стр. 111.
2. Авксентьев Ю.И. Настоящий сборник. «Методическое пособие к задаче № 77».