

5007

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА  
В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ  
С ПОМОЩЬЮ МОНОХРОМАТОРА**

Методические указания  
к лабораторной работе

Рязань 2016

УДК 539

Изучение интерференции света в тонких пленках с помощью монохроматора: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: И.А.Текучёва Б.С.Бобров, А.П. Соколов. Рязань, 2016. 8 с.

Изложены элементы теории, метод эксперимента, описание экспериментальной установки, порядок выполнения работы, а также указания по обработке полученных экспериментальных данных.

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих курс физики.

Табл. 1. Ил. 6. Библиогр.: 3 назв.

*Интерференция, тонкая пленка, разность хода, монохроматор*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. М.В. Дубков)

Изучение интерференции света в тонких пленках  
с помощью монохроматора

Составители: Т е к у ч ё в а Инна Алексеевна  
Б о б р о в Борис Сергеевич  
С о к о л о в Александр Павлович

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 29.04.16. Формат бумаги 60 × 84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,5.

Тираж 200 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**Цель работы:** изучение явления интерференции в тонкой плоскопараллельной пленке, определение показателя преломления и толщины пленки с помощью спектрального распределения интерференционной картины в проходящем свете.

## ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ И МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТА

При прохождении света через тонкие пленки, толщина которых сравнима с длиной волны света, и отражении света от их поверхностей при определенных условиях возникают когерентные световые пучки.

Схема образования плоскопараллельной пластинкой интерферирующих пучков света изображена на рис. 1. Интерференция возникает благодаря сложению лучей, отразившихся от верхней и нижней поверхностей пластинки  $P$ . Будем считать, что пластинка прозрачна, имеет показатель преломления  $n$  и находится в воздухе, показатель преломления которого с большим приближением равен единице. Пучок падающих на пластинку  $P$  когерентных лучей 1 и 2 под углом  $\alpha$  и преломляющихся под углом  $\beta$  испытывает частичное отражение на верхней и нижней ее поверхностях, в результате чего в отраженном свете интерферируют лучи  $1'$  и  $2'$ , а в проходящем – лучи  $1''$  и  $2''$ . Для количественного решения задачи необходимо найти разность хода для каждой пары интерферирующих лучей.

Разность хода для лучей  $1'$  и  $2'$  определяется разностью длин оптических путей, возникающих при движении фронта падающей волны  $AD$  от точки  $A$  на

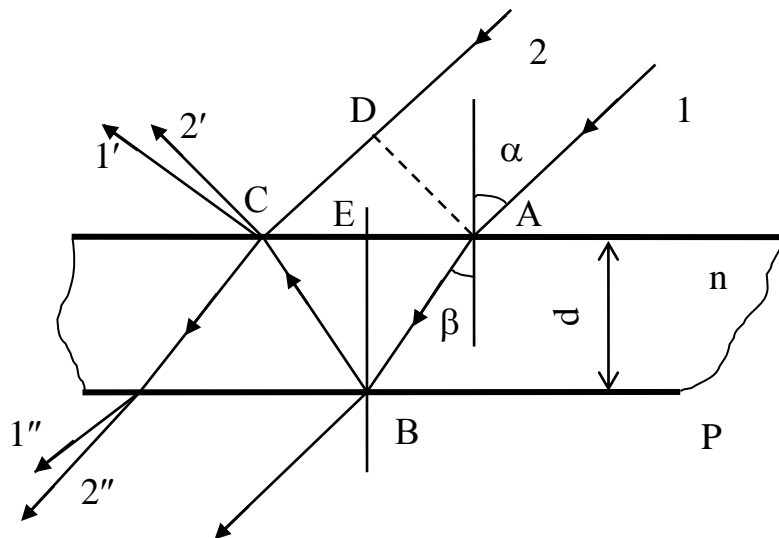


Рис. 1

пути  $ABC$  до точки  $C$  для луча 1 и от точки  $D$  до точки  $C$  для луча 2. Под оптической длиной пути понимается произведение обычной (геометрической) его длины и абсолютного показателя преломления среды, для которой производится вычисление. Приняв во внимание, что показатель преломления пленки  $n$ , для разности хода лучей  $1'$  и  $2'$  запишем:

$$\Delta n = n(AB + BC) - CD. \quad (1)$$

Из рисунка видно, что  $AB + BC = 2AB$ ,  $AB = \frac{d}{\cos \beta}$ , где  $d$  – толщина пленки,  $CD = AC \sin \alpha$ ,  $AC = 2AE$ . Но  $AE = d \tan \beta$ . Следовательно,  $CD = 2d \tan \beta \sin \alpha = \frac{2nd}{\cos \beta} \sin^2 \beta$ , для разности хода получаем

$$\Delta = \frac{2nd}{\cos \beta} - \frac{2nd}{\cos \beta} \sin^2 \beta \quad (2)$$

или

$$\Delta = 2nd \cos \beta. \quad (3)$$

Этой разности хода соответствует разность фаз

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta. \quad (4)$$

Однако если учесть, что при отражении световой волны от более плотной среды на верхней поверхности пластинки возникает дополнительная фаза, равная  $\pi$ , то для разности фаз следует записать

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta - \pi. \quad (5)$$

Для интерференции в отраженном свете условие максимума интерференции лучей 1' и 2' будет определяться равенством

$$\Delta \varphi = 2m\pi, \quad (6)$$

где порядок интерференционной картины  $m = 1, 2, 3 \dots$

Приравнявая правые части уравнений (5) и (6), для разности хода получаем условие максимума

$$\Delta_m = 2nd \cos \beta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (7)$$

Таким образом, максимумы света будут иметь место для разности хода интерферирующих лучей, равной нечетному числу полуволен.

Для лучей 1'' и 2'' разность хода также определяется формулой (3). Но так как при прохождении света через пленку скачка фазы на  $\pi$  не произойдет, условием максимума интерференции для этих лучей в проходящем свете будет

$$\Delta_m = 2nd \cos \beta = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (8)$$

т.е. максимумы света будут иметь место в этом случае для разности хода, равной четному числу полуволен.

Таким образом, интерференционные картины в отраженном и проходящем свете в отношении расположения максимумов на спектральной кривой будут взаимно дополнительными.

В данной работе образец пленки расположен под углом  $90^\circ$  к световому лучу, поэтому  $\cos\beta$  в формулах (7) и (8) может быть принят равным единице.

Графическое изображение распределения интенсивностей в отраженном  $I_r$  и проходящем  $I_d$  свете дано на рис. 2. Первый максимум в отраженном свете будет наблюдаться при разности хода  $\lambda/2$ , а в проходящем свете – при разности хода  $\lambda$ . В отраженном свете интерференция имеет отчетливый контрастный вид, так как здесь интерферируют лучи равной интенсивности. Как следствие, в минимумах будет происходить полное гашение света. Наоборот, в проходящем свете интерференционная картина будет менее контрастной, так как интерферируют лучи неравной интенсивности.

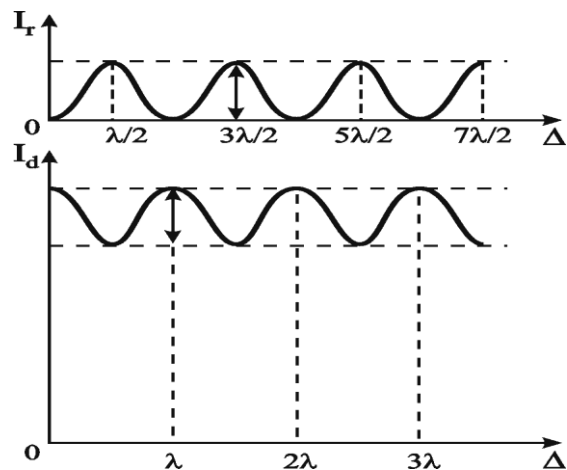


Рис. 2

Если далее учесть уравнение (8), то при постоянных параметрах  $n$  и  $d$  можно, варьируя длину волны света  $\lambda$ , наблюдать интерференционную картину с различными порядками интерференции  $m$  на спектральных кривых для коэффициентов отражения  $R = \frac{I_r}{I_0}$  или пропускания  $T = \frac{I_d}{I_0}$ .  $I_0$  – интенсивность падающего на пленку света. На рис. 3 в качестве примера приведено спектральное распределение коэффициента пропускания  $T$ , % для слоя  $CdTe$ .

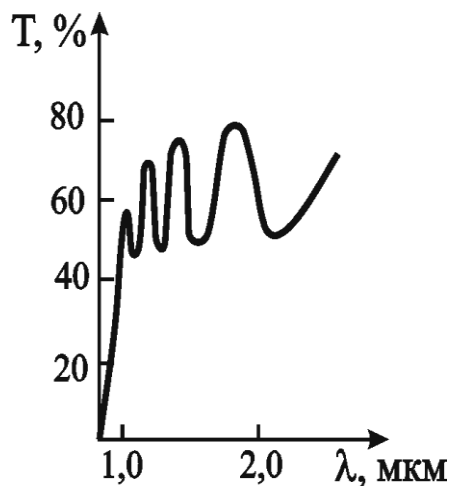


Рис. 3

Из теории известно, что контраст интерференционной картины для непоглощающей пленки

$$\Gamma = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{T_{\max}}{T_{\min}}, \quad (9)$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – интенсивности света в максимуме и минимуме;  $T_{\max}$  и

$T_{\min}$  – соответствующие коэффициенты пропускания, связанные с коэффициентом отражения соотношением

$$\Gamma = \frac{(1+R)^2}{(1-R)^2}. \quad (10)$$

Из (10) после простых алгебраических преобразований получаем уравнение

$$R = \frac{\sqrt{\Gamma} - 1}{\sqrt{\Gamma} + 1}. \quad (11)$$

С другой стороны, на основании формулы Френеля записываем соотношение между коэффициентом отражения и показателем преломления для непоглощающей или слабопоглощающей пленки:

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2. \quad (12)$$

Приравнивая правые части уравнений (11) и (12), после алгебраических преобразований получаем простое квадратичное уравнение для определения показателя преломления пленки  $n$ :

$$n^2 - 2n \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}} + 1 = 0. \quad (13)$$

Из условия максимума для интерференционной картины в проходящем свете (8) для определения толщины пленки получаем формулу

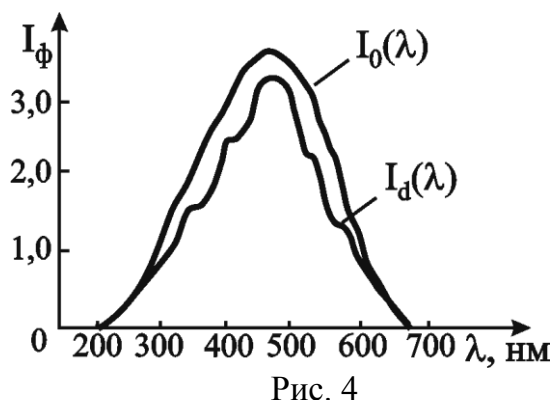
$$d = \frac{m}{2n} \frac{\lambda}{2}. \quad (14)$$

Порядок интерференции определяется соотношением

$$m = \frac{\lambda_{m+1}}{\lambda_m - \lambda_{m+1}}, \quad \lambda_m > \lambda_{m+1}, \quad (15)$$

где  $\lambda_m$  и  $\lambda_{m+1}$  – длины волн двух соседних экстремумов (максимумов или минимумов). При этом для  $m$  берется ближайшее целое число, если расчет по приведенной формуле дает дробное значение.

В основе методики определения показателя преломления  $n$  и толщины пленки  $d$  лежит получение двух спектральных характеристик:



– первой  $I_0(\lambda)$  для катода фотоумножителя, представляющей собой зависимость фототока от длины волны  $\lambda$  (частоты  $\nu$ ) падающего на катод света, которая зависит от чувствительности фотокатода и спектральной характеристики лампы накаливания, аналогичной представленной на рис. 4;

– второй, более сложной  $I_d(\lambda)$ , зависящей не только от указанных свойств фотокатода и лампы накаливания, но и от физических свойств пленки, расположенной на пути светового пучка, и возникающего в ней явления интерференции. На основании этих характеристик находят спектральное распределение коэффициента пропускания:

$$T(\lambda) = \frac{I_d(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (16)$$

для всех длин волн спектрального диапазона, использованного для измерений в виде, аналогичном представленному для слоя  $CdTe$  на рис. 3; далее анализируют это распределение, определяя длины волн максимумов  $T(\lambda)$  и значения  $T_{\max}(\lambda)$  и  $T_{\min}(\lambda)$ .

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка собрана на базе призматического монохроматора УМ-2. Монохроматор (рис. 5) представляет собой

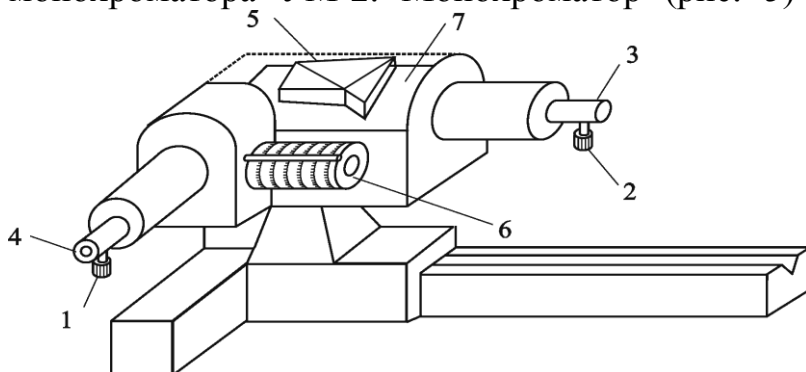
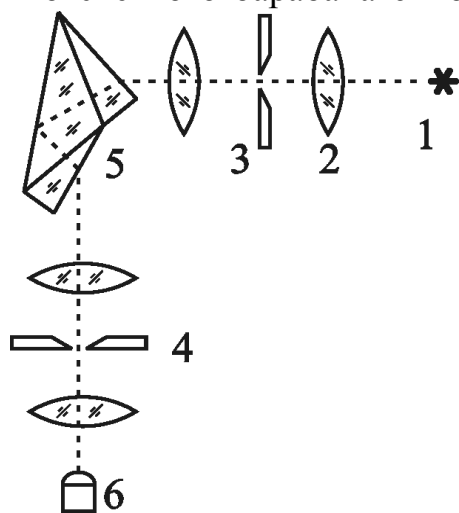


Рис.5

спектроскоп, у которого окуляр зрительной трубы заменен щелью 4, расположенной в фокальной плоскости объектива. Призма 5 осуществляет спектральное разложение света лампы накаливания.

Поворачивая призму монохроматора путем вращения барабана 6, можно направить на выходную щель 4 отдельные спектральные интервалы излучения лампы накаливания и тем самым изменять частоту освещающего фотокатод света. Длина волны, а следовательно, и частота света определяются по положению отсчетного барабана 6 монохроматора. Пересчет делений барабана в



длины волн производится по графику калибровки барабана, приложенному к установке.

Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 6. Свет от источника 1 с помощью однолинзового конденсора 2 фокусируется на входную щель 3 монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и далее через выходную щель 4 попадает на катод фотоумножителя 6. Источником света служит лампа накаливания 12 В, питающаяся от понижающего трансформатора. С помощью

Рис. 6

переменной входной щели 3 можно менять величину светового потока. Регулировка выходной щели 4 позволяет выделять узкий спектральный интервал пучка света, прошедшего через призму 5 монохроматора.

Питание ФЭУ осуществляется от стабилизированного источника питания, который дает на выходе напряжение от 800 до 2500 В при токе 4 мкА. «Плюс» выходного напряжения соединен с корпусом источника. Нестабильность исходного напряжения источника питания после прогрева в течение 1 часа не более 0,5 %. Минимальное рабочее напряжение для данного фотоумножителя ФЭУ-18А – 750 В, максимальное – 1500 В. Катод фотоумножителя сурьмяно-цезиевый.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Для подключения фотоумножителя необходимо:

1.1. Поставить в стабилизаторе напряжения выключатель выходного напряжения в положение ВЫКЛЮЧЕНО.

1.2. Поставить ручку ступенчатой регулировки напряжения в положение 1000 В.

1.3. Включить штепсельную вилку шнура питания стабилизатора в розетку 220 В, 50 Гц.



1.4. Включить тумблер СЕТЬ 220 В. При этом загорится сигнальная лампочка, указывающая полярность соединенного с корпусом полюса прибора, и через 20-30 с киловольтметр должен показать величину выходного напряжения.

1.5. Через 2-3 мин после включения сети тумблером «Напряжение выхода» включить стабилизатор на нагрузку. При этом должна загореться сигнальная лампочка выходного напряжения красного цвета.

2. Включить штепсельную вилку шнура питания источника света в розетку 220 В, 50 Гц.

3. Установить ширину выходной щели 4 монохроматора (рис. 5) с помощью регулировочного барабанчика 1 не менее 0,1 мм. Цена деления 0,01 мм, поэтому показания на барабанчике не должны превышать деления с цифрой 10.

4. Ширину входной щели 3 следует подобрать с помощью барабанчика 2 так, чтобы при максимальном сигнале, снимаемом с фотоумножителя, отклонение стрелки не выходило за пределы шкалы микроамперметра. Для этого сначала открыть входную щель и поворачивать барабан 6 микрометрического винта поворотного механизма призменного столика 7 до тех пор, пока ток не достигнет максимального значения. После этого следует скорректировать входную щель, наблюдая за стрелкой микроамперметра, которая не должна выходить за пределы шкалы.

5. Для получения спектральной характеристики катода фотоумножителя  $I_0(\lambda)$  менять длину волны света, освещающего фотокатод, вращением барабана 6 призменного столика монохроматора. При этом отмечать деления барабана и показания микроамперметра. Для пересчета делений барабана в длины волн необходимо использовать прилагаемый к установке график калибровки барабана.

6. Далее поставить на пути светового пучка перед монохроматором пластинку с пленкой в обойме и, повторяя действия п. 5, получить спектральную характеристику  $I_d(\lambda)$ .

7. Используя данные спектральных характеристик для каждой длины волны, вычислить по формуле (16) величины коэффициентов пропускания и в совокупности получить спектральное распределение коэффициента пропускания  $T(\lambda)$ .

8. Результаты измерений свести в таблицу.

№ деления барабана	Длина волны $\lambda$ , нм	Сила тока $I_0$ , мкА	Сила тока $I_d$ , мкА	Коэффициент пропускания $T$ , %

9. Построить кривую спектрального распределения коэффициента пропускания и произвести ее анализ.

9.1. Найти значения  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$ . Используя их и учитывая соотношение (9), вычислить по формуле (13) показатель преломления пленки.

9.2. Найти точные значения длин волн, соответствующие двум расположенным рядом экстремумам (максимумам или минимумам), по которым, используя формулу (15), определить порядок интерференции  $m$ .

10. По формуле (14) вычислить толщину пленки  $d$ .

11. Оценить систематические погрешности в определении коэффициентов пропускания, длин волн, порядка интерференционной картины, показателя преломления и толщины пленки.

### ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называется интерференцией света?
2. Как и где возникают когерентные лучи в отраженном и проходящем свете при падении светового пучка на плоскопараллельную пленку?
3. Как получается спектральное распределение коэффициента пропускания при выполнении данной работы?
4. В чем заключается методика определения показателя преломления  $n$  и толщины пленки  $d$ ?
5. Вывести формулу для определения показателя преломления  $n$ .
6. Используя условие максимума (8) для двух последующих порядков интерференционной картины  $m$  и  $m+1$  соответственно длинам волн  $\lambda_m$  и  $\lambda_{m+1}$ , получить формулу (15) для вычисления интерференционного порядка  $m$ .

ИСХОДНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ органов управления: тумблер «Сеть 220 В» – выкл., тумблер «Напряжение выхода» – выкл., тумблер «Киловольты, вольты» – в крайнем левом положении.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов А.П., Соколов А.А. Интерференция света: метод. указания/Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2009. С. 1-20.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. С. 62-80.
3. Трофимова Т.Н. Курс физики. М.: Высш. школа, 1985. С. 252-264.