

Лабораторная работа № 5Н Определение длины электромагнитных волн интерференционными методами (кольца Ньютона)

Цель работы: Изучение интерференции света в схеме колец Ньютона и определение длины волны света.

Оборудование: Микроскоп МБИ-1 с осветителем для работы в отражённом свете, сборка из плоской стеклянной пластины и плоско-выпуклой сферической линзы, красный и зелёный светофильтры.

Теоретическое введение

Устойчивая интерференционная картина возникает при наличии когерентных¹ источников волн. Источники считаются таковыми, если:

- они излучают волны со строго одинаковой частотой;
- разность фаз между колебаниями источников длительное время сохраняется постоянной;
- для поперечных волн поляризация одинакова.

Одним из способов получения когерентных источников является метод разделения амплитуды волны. Достаточно свет одного источника развести в пространстве, используя отражение и преломление, установить каким-либо способом разность хода лучей, а затем вновь свести лучи вместе. Впервые данный способ предложил Френель².

1. Интерференция в тонких плёнках. Полосы равного наклона.

Пусть световой луч 1 от точечного источника S падает на плоскопараллельную пластину с показателем преломления n и толщиной d . (рис. 5Н.1). В точке A верхней поверхности падающий луч разделяется на отражённый луч 2 и преломлённый луч 3. Преломлённый луч 3, в свою очередь, отражается от нижней поверхности пластины в точке B (луч 5), а затем преломляется в

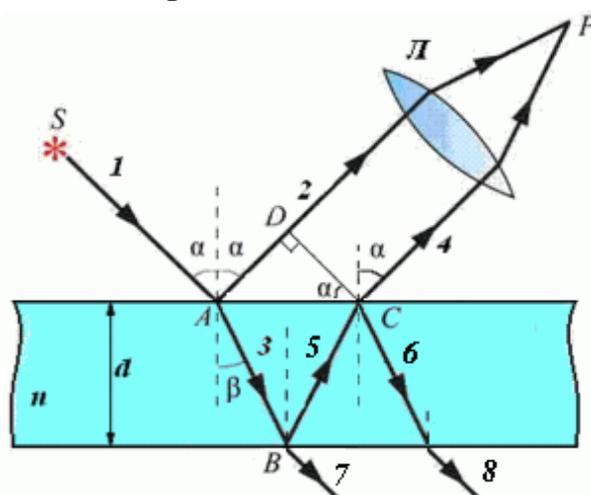


Рис. 5Н.1

¹ От латинского *cohaerentia* – связь.

² Френель Огюстен Жан (Augustin-Jean Fresnel) (10.05.1788-14.07.1827) – французский физик, один из основоположников волновой оптики. Создал (1818) теорию дифракции света, положив в основу принцип Гюйгенса и интерференцию волн (принцип Гюйгенса – Френеля). Доказал (1821) поперечность световых волн, объяснил поляризацию света. Создал двойные зеркала, призмы и линзы, названные его именем.

точке C (луч 4). Полученные таким образом лучи 2 и 4 когерентны и параллельны друг другу. Область интерференции локализована на бесконечности, однако лучи можно свести вместе с помощью линзы L (роль линзы может выполнить человеческий глаз).

Из рисунка ясно, что оптическая разность хода

$$\Delta = n(AB + BC) - AD.$$

Из геометрии и закона преломления очевидно, что

$$\begin{aligned} \Delta &= n2|AB| - |AD| = 2n \frac{d}{\cos \beta} - |AC| \sin \alpha = \\ &= 2n \frac{d}{\cos \beta} - 2d \operatorname{tg} \beta \sin \alpha = \frac{2d}{\cos \beta} (n - \sin \beta \sin \alpha). \end{aligned}$$

Известно, что $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$, $\rightarrow \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n}$, $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{n}$.

Тогда

$$\Delta = \frac{2dn}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \left(n - \frac{\sin^2 \alpha}{n} \right) = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = 2dn \cos \beta. \quad (5H.1)$$

При отражении от оптически более плотной среды происходит потеря полуволны, или фаза волны изменяется на π . В нашем случае такая потеря происходит в точке A .

Поэтому условия максимумов и минимумов запишутся так:

$$2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad m=0,1,2,3\dots - \text{максимумы},$$

$$2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2} = (2m+1) \frac{\lambda}{2}, \quad m=0,1,2,3 - \text{минимумы}.$$

Здесь λ – длина волны света. Так как d , n , λ для одной пластинки постоянны, то максимумы и минимумы зависят от угла, под которым мы смотрим на пластинку или плёнку. Поэтому такие интерференционные полосы называются полосами равного наклона.

При нормальном падении света условия принимают вид

$$2dn \pm \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad \Rightarrow \quad dn = \left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2} \quad - \text{максимумы}, \quad (5H.2)$$

$$2dn \pm \frac{\lambda}{2} = (2m+1) \frac{\lambda}{2}, \quad \Rightarrow \quad dn = m \frac{\lambda}{2} \quad - \text{минимумы}.$$

Амплитуды отражённых лучей 2 и 4 сравнимы друг с другом, поэтому интерференционная картина получается вполне отчётливой.

Такую же картину можно наблюдать и в проходящем свете. Максимумы и минимумы меняются местами. В этом случае амплитуда преломлённого луча 7 намного больше, чем отражённого 8, и картина получается более расплывчатой.

2. Интерференция в тонких плёнках. Полосы равной толщины

Рассмотрим интерференционную картину, получаемую от пластинки переменной толщины (клина). Направления распространения световой волны, отражённой от верхней и нижней границы клина, не совпадают. Отражённые и преломлённые лучи пересекаются, поэтому интерференционную картину можно наблюдать и без использования линзы, если поместить экран в плоскость точек пересечения лучей P_1P_2 (рис. 5Н.2). Заметим, что при малых углах клина β и падения луча α область интерференции локализована вблизи поверхности клина.

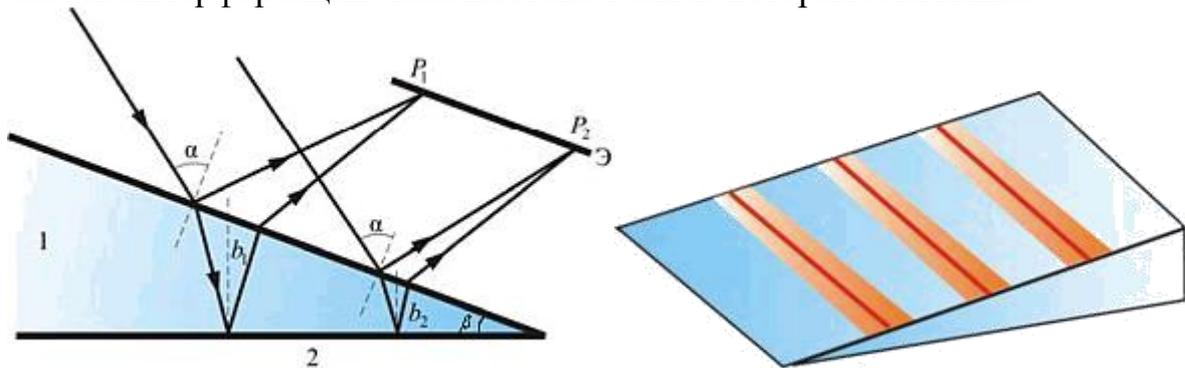


Рис. 5Н.2

Разность хода лучей, отразившихся от различных участков клина, будет неодинаковой, и на экране при освещении монохроматическим светом возникнут тёмные и светлые полосы, параллельные ребру клина, как показано на рис. 5Н.2. Каждая из таких полос возникает в результате отражения от участков клина с одинаковой толщиной, поэтому их называют полосами равной толщины.

Формулы (5Н.2) сохраняют своё значение, если d – толщина клина в точке падения луча.

3. Кольца Ньютона

Толщина клина может меняться и нелинейно. Также может быть изменена геометрия задачи.

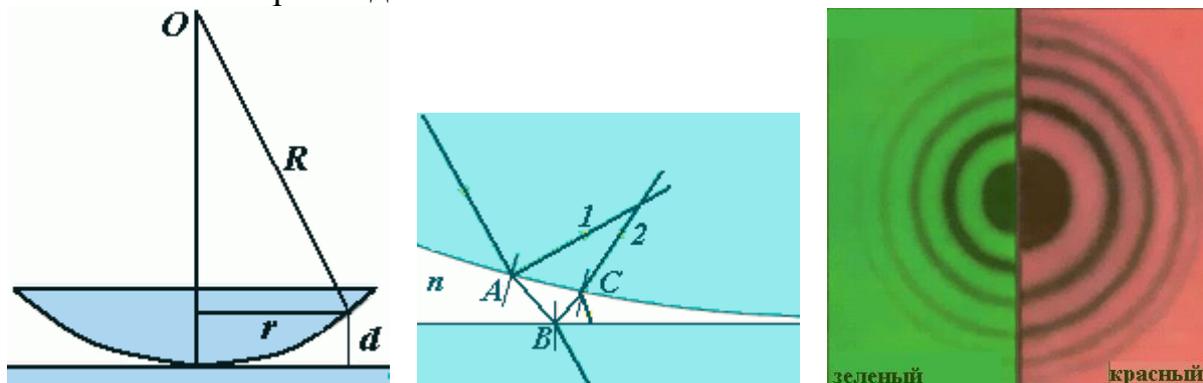


Рис. 5Н.3. Установка для наблюдения колец Ньютона

Если наложить сферическую линзу на отражающую поверхность, то получим воздушный клин ($n = 1$), и интерференционные полосы в отражённом свете образуют concentric circles with a dark center.

(нулевым) кругом в середине, то есть в месте контакта. Эта интерференционная картина называется кольцами Ньютона, который наблюдал и изучал её в 1675 году (рис. 5Н.3).

Очевидно, что $r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2 = (2R - d)d \approx 2Rd$, так как радиус кривизны линзы достаточно велик ($2R \gg d$). Удобнее и легче измерять диаметры колец $D = 2r$. Тогда

$$d = \frac{r^2}{2R} = \frac{D^2}{8R}.$$

Вследствие деформации пластинки и линзы в точке касания толщина клина уменьшается на величину h – глубина деформации. Тогда условия максимумов и минимумов (5Н.2) в отражённом свете запишутся как

$$2n(d - h) = 2n\left(\frac{D_m^2}{8R} - h\right) = (2m - 1)\frac{\lambda}{2} \text{ – максимумы (светлые кольца),}$$

$$2n(d - h) = 2n\left(\frac{D_m^2}{8R} - h\right) = 2m\frac{\lambda}{2} \text{ – минимумы (тёмные кольца).}$$

Отсюда

$$D_m^2 = 4R\left(m - \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{n} + 8Rh \text{ – светлые кольца,} \quad (5Н.3)$$

$$D_m^2 = 4Rm\frac{\lambda}{n} + 8Rh \text{ – тёмные кольца.}$$

Для двух разных колец при можно записать

$$D_m^2 - D_l^2 = 4(m - l)R\frac{\lambda}{n}, \quad (5Н.4)$$

где D_m и D_l – диаметры светлых (или тёмных) интерференционных колец.

Выражения 5Н.3 можно переписать следующим образом

$$\begin{cases} D_m^2 = 2R\frac{\lambda}{n}(2m - 1) + 8Rh, \text{ светлые} \\ D_m^2 = 2R\frac{\lambda}{n}(2m) + 8Rh, \text{ тёмные} \end{cases}.$$

и затем записать их одной формулой

$$D_m^2 = 2R\frac{\lambda}{n}M + 8Rh, \text{ где } \begin{cases} M = 1, 3, 5, \dots, \text{ для светлых колец} \\ M = 2, 4, 6, \dots, \text{ для тёмных колец} \end{cases}. \quad (5Н.5)$$

Если падающий свет немонахроматический, то разным длинам волн соответствуют разные радиусы колец, то есть вместо чередования тёмных и светлых областей получится система цветных колец. Так как на ширине кольца осуществляется плавный переход от максимума к минимуму, то даже в пределах первого порядка происходит наложение одних цветов на другие. В результате этого возникает чередование оттенков, не совпадающее с обычным спектром [1, С117].

Пусть источник равномерно излучает в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 . Полное размывание картины произойдет, когда максимум $(m_{\max}+1)$ -го порядка для волны λ_1 совпадёт с максимумом m_{\max} -го порядка для длины волны с λ_2 . Тогда из (5Н.3) для светлых колец имеем

$$D_{m_{\max}}^2 = 4R \left(m_{\max} + 1 - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda_1}{n} + 8Rh = 4R \left(m_{\max} - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda_2}{n} + 8Rh,$$

откуда

$$\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} = m_{\max} (\lambda_2 - \lambda_1).$$

Таким образом

$$m_{\max} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{\bar{\lambda}}{\Delta\lambda}, \quad (5Н.6)$$

где $\bar{\lambda}$ – средняя длина волны излучаемого света, а $\Delta\lambda$ – ширина диапазона (спектральный интервал).

Например, если рассматривать весь красный диапазон видимого света от 625 нм до 740 нм, то $m_{\max} \leq 6$.

Задача может быть поставлена и наоборот. Экспериментально подсчитав число колец, определить спектральный интервал

$$\Delta\lambda = \frac{\bar{\lambda}}{m_{\max}}. \quad (5Н.7)$$

Используя (5Н.3) и (5Н.6) можно оценить максимальную толщину клина между стеклянной пластинкой и линзой для наблюдения интерференционной картины

$$\begin{aligned} d_{\max} &= \frac{D_{m_{\max}}^2}{8R} = \frac{1}{2} \left(m_{\max} + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda_1}{n} + h = \frac{1}{2n} \left(\frac{\bar{\lambda}}{\Delta\lambda} + \frac{1}{2} \right) \left(\bar{\lambda} - \frac{\Delta\lambda}{2} \right) + h = \\ &= \frac{1}{2n\Delta\lambda} \left(\bar{\lambda} + \frac{\Delta\lambda}{2} \right) \left(\bar{\lambda} - \frac{\Delta\lambda}{2} \right) + h = \frac{1}{2n\Delta\lambda} \left(\bar{\lambda}^2 - \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)^2 \right) + h = \frac{\bar{\lambda}^2}{2n\Delta\lambda} - \frac{\Delta\lambda}{8n} + h \end{aligned}$$

Пренебрегая последними слагаемыми, получаем

$$d_{\max} = \frac{D_{m_{\max}}^2}{8R} \approx \frac{\bar{\lambda}^2}{2n\Delta\lambda} = m_{\max} \frac{\bar{\lambda}}{2n}. \quad (5Н.8)$$

Описание установки

На рис. 5Н.4 схематично показана установка для наблюдения колец Ньютона. Источником света служит лампа накаливания S , лучи от которой проходят через диафрагму C и светофильтр D и попадают на полупрозрачную пластинку P , установленную под углом 45° к оси микроскопа. После отражения от пластинки свет проходит через объектив микроскопа O и падает на линзу L , которая закреплена в оправе с плоской пластинкой на столике микроскопа.

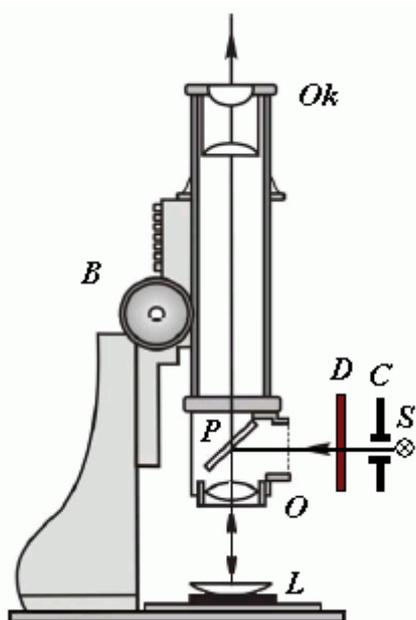


Рис. 5Н.4

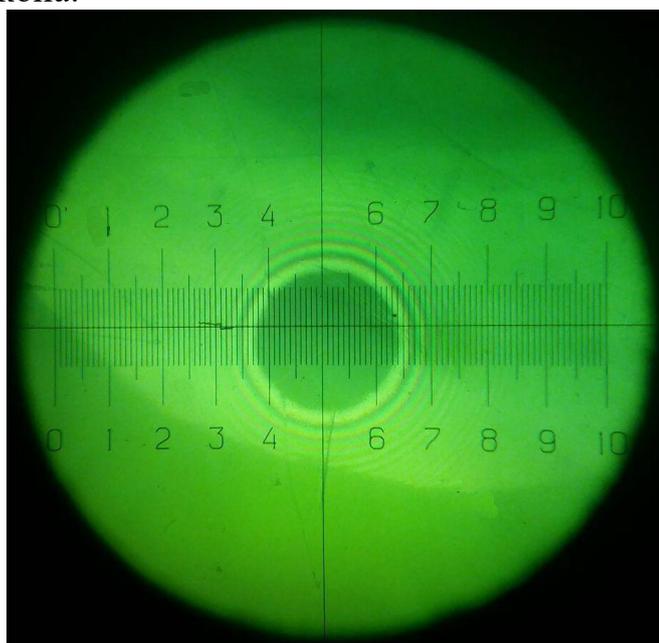


Рис. 5Н.5. Кольца в микроскопе

Интерференционные кольца наблюдаются через микроскоп, который на резкость наводится винтом B . Для отсчёта диаметров колец в поле зрения микроскопа имеется неподвижная цифровая шкала (рис. 5Н.5). Цена деления шкалы микроскопа, радиус сферы линзы задаются.



Рис. 5Н.6 Общий вид установки

Характеристики установки:

Цена деления микроскопа:
 $c = 0,016$ мм/дел при длине
 тубуса 160 мм.

Установка 1:

радиус кривизны линзы
 $R = (40 \pm 2)$ мм.
 диаметр линзы $d_{\text{линзы}} = 31,4$ мм

установка 2:

радиус кривизны линзы
 $R = (100 \pm 5)$ мм.
 диаметр линзы $d_{\text{линзы}} = 36,1$ мм

Методика выполнения работы

1. Установить на столике микроскопа держатель с линзой и плоскопараллельной прозрачной пластинкой.
2. Включить блок питания лампы осветителя в сеть 220 В.
3. Произвести настройку установки в белом свете или со светофильтром и получить в поле зрения цветные или монохромные интерференционные кольца. Отрегулировать яркость картины с помощью диафрагмы.
4. Наблюдая в окуляр интерференционную картину, добиться отчётливого изображения колец Ньютона с помощью винтов грубой и точной наводки тубуса микроскопа.
5. Плавными поворотами юстировочных винтов предметного столика микроскопа установить среднюю линию шкалы микроскопа так, чтобы она проходила через центр колец.

I. Определение спектрального интервала

1. В белом свете отсчитать видимое число m_{max} интерференционных колец. При этом принять зелёное кольцо в качестве основного ($\bar{\lambda} = 550$ нм).
2. По формулам (5Н.7) и (5Н.8) определить спектральный интервал и предельную толщину слоя для белого света.
3. По известному диаметру линзы рассчитать d_{max} и сравнить результаты.

II. Определение длины волны красного света

1. Установить красный светофильтр.
2. Установить шкалу микроскопа горизонтально.
3. По серединам светлых и тёмных колец определить в делениях шкалы микроскопа их радиусы слева и справа от центра шкалы не менее чем для 5 хорошо видимых светлых и тёмных колец. Результаты внести в таблицу 1.
4. Повернуть окуляр микроскопа на 90° и определить радиусы исследуемых колец в перпендикулярном направлении сверху и снизу от центра шкалы. Результаты внести в таблицу 1.
5. Рассчитать диаметры D колец в делениях и их квадраты D^2 в дел².
6. Комбинируя попарно отдельно светлые и тёмные кольца, по формуле

$$R\lambda = \frac{D_m^2 - D_l^2}{4(m-l)} \quad (5Н.9)$$

рассчитать величину $R\lambda$ в дел². Результаты внести в таблицу 2.

7. Зная цену деления шкалы микроскопа и радиус кривизны линзы, рассчитать длину волны красного света для каждого случая.
8. Рассчитать среднее значение длины волны. Дать оценку погрешности.
9. Для одного из случаев рассчитать погрешность по формуле для косвенных измерений.
10. Для красного света определить спектральный интервал и предельную толщину слоя (пункты 2 и 3 из задания I).

III. Определение длины волны зелёного света

1. Установить зелёный светофильтр.
2. Выполнить пп.2-9 из задания II.

IV. Определение длины волны красного света графическим методом

Формула (5Н.5) описывает линейную зависимость $D_m^2(M) = aM + b$, где $a = 2R\lambda$, $b = 8hR$.

1. По экспериментальным точкам построить указанную зависимость. Методом наименьших квадратов определить коэффициенты a и b .
2. Определить длину волны и глубину деформации.

$$\lambda = \frac{a}{2R}, \quad h = \frac{\lambda b}{4a}.$$

Контрольные вопросы

1. Какую интерференционную картину называют «кольцами Ньютона»?
2. Почему в отражённом свете интерференционная картина проявляется лучше, чем в проходящем?
3. Почему в отражённом свете центральная область интерференции является тёмной, а картина не охватывает всё поле зрения микроскопа?
4. От чего зависит количество наблюдаемых колец?
5. Почему наблюдаемые кольца имеют радужную окраску? В каком случае мы будем наблюдать тёмные и светлые кольца?
6. Почему по мере удаления от центра кольца располагаются ближе друг к другу?
7. Что произойдет с кольцами Ньютона, если промежуток между линзой и пластинкой заполнить жидкостью с $n_{\text{жид}} > n_{\text{возд}}$?
8. Можно ли при наблюдении колец Ньютона в отражённом свете получить в центре не тёмное, а светлое кольцо? Если да, то сформулируйте условия, которые для этого необходимы.

Дополнительная литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика, 6-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 848 с.
2. Интерференция в тонких плёнках. [Электронный ресурс]. URL: http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B1%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%B8%20%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B.%20%D0%B3%D0%B5%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%B8%20%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%20%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0/08-5.htm.
3. Определение радиуса кривизны линзы и спектральных характеристик светодиодов с помощью колец Ньютона. Задача № 132а./ Лабораторный практикум по физике. Оптика // Митин И.В., Вишнякова Е.А. Москва, 2007.

Лабораторная работа № 5Н. Лист отчёта
Определение длины электромагнитных волн интерференционными методами
(кольца Ньютона)

Выполнил студент _____
 Факультет _____ курс _____ группа _____
 Проверил _____
 Показания сняты _____
 Зачтено _____

Погрешности измерительных приборов. $\alpha = \underline{\hspace{2cm}}$ %.

Измерительный прибор	ω – цена деления	$\Delta_{\text{окр}}$ – округления	$\Delta_{\text{пр}}$ – приборная	$\Delta_{\text{суб}}$ – субъективная	Единицы измерения
микроскоп	0,016				мм

I. Определение спектрального интервала

$\bar{\lambda} = 550 \text{ нм}$

$m_{\text{max}} = \underline{\hspace{2cm}}$

$\Delta\lambda = \underline{\hspace{2cm}} \text{ нм}$

$d_{\text{max}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ нм}$

II. Определение длины волны красного света

Таблица 1

№	№ кольца	радиус кольца по горизонтали		радиус кольца по вертикали		диаметр кольца D , дел	D^2 , дел ²
		отсчёт слева, дел	отсчёт справа, дел	отсчёт сверху, дел	отсчёт снизу, дел		
1	1	светлое					
2	1	тёмное					
3	2	светлое					
4	2	тёмное					
5	3	светлое					
6	3	тёмное					
7	4	светлое					
8	4	тёмное					
9	5	светлое					
10	5	тёмное					

Таблица 2

пары колец	светлые	тёмные	длина волны λ , нм	длина волны λ , нм
	$R\lambda$, дел ²	$R\lambda$, дел ²		

Сравнение: $\lambda_{\text{кр}} = (\underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}}) \text{ нм}$, $\varepsilon_{\lambda} = \underline{\hspace{2cm}} \%$.
 Диапазон длин волн для красного света _____ нм

