

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
БЕЛАРУСЬ**

Белорусский национальный технический университет

Кафедра физики

***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ
МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА
С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА***

Методические указания к лабораторной работе по физике
для студентов инженерно-технических специальностей

Учебное электронное издание

Минск ◊ БНТУ ◊ 2009

УДК 537.226 (076.5)

Авторы:

П.Г. Кужир
А.А. Баранов
Н.П. Юркевич

Рецензенты: М.А. Князев, д.ф.-м.н., профессор кафедры «Техническая физика»
БНТУ;

Л.Н. Смурага, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Техническая физика» БНТУ.

В работе рассматривается явление интерференции на примере колец Ньютона. Приводится вывод формулы для вычисления длины волны монохроматического света по измеренным радиусам колец Ньютона.

Методические указания к лабораторной работе предназначены для студентов инженерно-технических специальностей всех форм обучения.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37
E-mail: NPYurkevich@mail.ru;
Регистрационный № БНТУ/ФЭС57 – 2.2009

© БНТУ, 2009
© Кужир П.Г., Баранов А.А.,
Юркевич Н.П., 2009
© Юркевич Н.П., компьютерный
дизайн, 2009

Цель работы: изучить явление интерференции света и вычислить длину волны монохроматического света по измеренным радиусам колец Ньютона.

Оборудование и материалы: лабораторная установка, включающая микроскоп с микрометром, линза и плоскопараллельная пластинка.

1. Двойственная природа света

Свет имеет двойственную природу: корпускулярную и волновую.

Корпускулярная природа света проявляется в различных явлениях, например, в явлении фотоэффекта. При этом свет представляет собой поток частиц или квантов света, которые называются **фотонами**. К корпускулярным свойствам света относятся

- энергия фотона $E = h\nu$,

- масса фотона $m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$;

- импульс фотона $p = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$,

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка;

ν – частота света;

c – скорость света в вакууме;

λ – длина волны;

- масса покоя фотона, которая равна нулю.

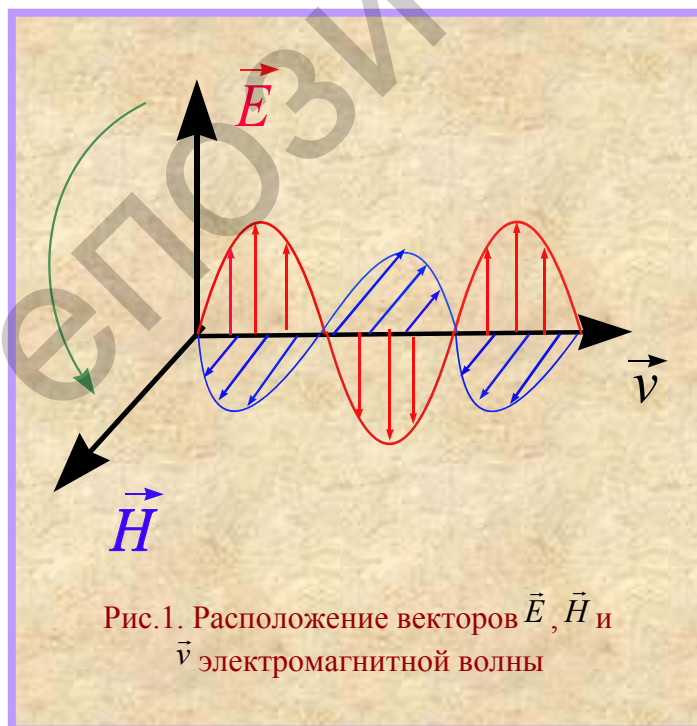


Рис.1. Расположение векторов \vec{E} , \vec{H} и \vec{v} электромагнитной волны

Волновая природа света проявляется в явлениях интерференции, дифракции, поляризации, дисперсии. При этом свет представляет собой поток электромагнитных волн. Электромагнитные волны являются **поперечными**. В электромагнитной волне напряженности электрического \vec{E} , магнитного \vec{H} полей и вектор \vec{v} скорости распространения волны взаимно перпендикулярны и образуют правую тройку векторов (рис.1). Вектора \vec{E} и \vec{H} колеблются в

одной фазе – они одновременно достигают максимальных значений и одновременно обращаются в ноль.

Монохроматической называется волна, у которой проекции векторов напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей на оси прямоугольной декартовой системы координат совершают гармонические колебания с постоянной частотой ν . Данная частота ν называется частотой волны.

Уравнения колебаний векторов \vec{E} и \vec{H} монохроматической электромагнитной волны имеют вид

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{s}{v}\right) + \alpha_0\right),$$
$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{s}{v}\right) + \alpha_0\right),$$

где \vec{E}_0, \vec{H}_0 - амплитуды колебаний векторов напряженностей электрического и магнитного полей;

$\omega = 2\pi\nu$ - циклическая частота;

$\left(\omega\left(t - \frac{s}{v}\right) + \alpha_0\right)$ - фаза колебаний;

α_0 - начальная фаза колебаний;

t - время;

s - расстояние от источника волны до данной точки пространства;

v - скорость распространения электромагнитной волны в среде.

Связь скорости распространения волны в среде v со скоростью распространения волны в вакууме c устанавливается соотношением

$$v = \frac{c}{n},$$

где n - абсолютный показатель преломления среды.

При переходе из одной среды в другую **частота** электромагнитной волны **остаётся постоянной**, а скорость распространения и длина волны изменяются.

Распространение электромагнитных волн связано с переносом энергии. **Интенсивностью электромагнитной волны** I называется величина, численно равная энергии, которую переносит волна за единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной к направлению распространения волны.

Интенсивность волны I пропорциональна квадрату амплитуды вектора напряженности электрического поля \vec{E}_0 :

$$I \sim E_0^2. \quad (1)$$

Волновой характеристикой электромагнитных волн является длина волны λ . В зависимости от величины длины волны λ электромагнитные волны образуют так называемую **шкалу электромагнитных волн**, включающую радиоволны (длинные, средние, короткие, ультракороткие), инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение, γ -излучение. Область видимого света очень мала и лежит в диапазоне $400 \text{ нм} \leq \lambda \leq 760 \text{ нм}$. Нижняя граница 400 нм соответствует фиолетовому свету, верхняя 760 нм – красному. $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$.

Максимум чувствительности глаза достигается для зеленого света, длина волны которого 555 нм. Область видимого света заключена в пределах $4 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \leq \nu \leq 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.

На глаз человека основное действие оказывает вектор напряженности электрического поля \vec{E} и поэтому его называют **световым вектором**. В дальнейшем будем рассматривать только световой вектор \vec{E} .

2. Интерференция света. Условия максимума и минимума интерференции

Для электромагнитных волн небольших интенсивностей справедлив **принцип суперпозиции** волн: **резльтирующая напряженность электрического поля при наложении нескольких электромагнитных волн равна векторной сумме напряженностей электрических полей каждой из волн в отдельности.**



Рис.2. Интерференция волн в точке М

Рассмотрим наложение когерентных волн, мощными источниками которых являются лазеры. **Когерентными** называются волны, у которых частоты равны и разность фаз с течением времени остается постоянной. При наложении когерентных волн наблюдается явление интерференции.

Интерференция света – это

явление перераспределения световой энергии в пространстве при наложении когерентных волн, приводящее к усилению или ослаблению света в различных точках пространства.

Поскольку световые волны являются поперечными, отчетливая **интерференционная картина наблюдается** лишь для когерентных волн, у которых колебания светового вектора \vec{E} совершаются **вдоль одного направления**. **Интерференция не наблюдается** в случае **взаимной перпендикулярности векторов \vec{E}** накладываются волн.

Найдем условия максимума и минимума интерференции двух когерентных волн в заданной точке пространства M . Волны проходят геометрические пути s_1 и s_2 от источников излучения 1 и 2 (рис.2) в однородных средах с абсолютными показателями преломления n_1 и n_2 .

Уравнения световых волн имеют вид

$$E_1 = E_{01} \cos \left(\omega \left(t - \frac{s_1}{v_1} \right) + \alpha_{01} \right) = E_{01} \cos \varphi_1,$$

$$E_2 = E_{02} \cos \left(\omega \left(t - \frac{s_2}{v_2} \right) + \alpha_{02} \right) = E_{02} \cos \varphi_2.$$

В результате сложения данных волн результирующая волна будет гармонической с такой же циклической частотой ω и амплитудой

$$E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \Delta\varphi, \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega \left(\frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) + (\alpha_{02} - \alpha_{01})$$

где $\alpha_{02} - \alpha_{01}$ - разность фаз.

Если $(\alpha_{02} - \alpha_{01}) = 0$, то разность фаз $\Delta\varphi$ будет

$$\Delta\varphi = \omega \left(\frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right).$$

Максимум интерференции наблюдается, если **разность фаз $\Delta\varphi$ кратна четному числу π** :

$$\Delta\varphi = 2\pi m, \quad (3)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ - порядок интерференционного максимума.

Тогда из (3) с учетом (2) следует **усиление напряженности поля результирующего колебания**:

$$E^2 = (E_{01} + E_{02})^2.$$

Четкую интерференционную картину возможно наблюдать только для небольших значений m , так как при больших значениях m происходит наложение максимумов, и интерференционная картина полностью смазывается.

На практике наблюдается интенсивность I результирующей волны. Поэтому с учетом (1) условие максимума интерференции для интенсивности будет

$$I = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2,$$

где I_1, I_2 – интенсивности исходных световых волн.

Минимум интерференции наблюдается, если **разность фаз $\Delta\varphi$ кратна нечетному числу π :**

$$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi, \quad (4)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Тогда из (2) следует **ослабление напряженности поля результирующего колебания:**

$$E^2 = (E_{01} - E_{02})^2,$$

а для **интенсивностей условие минимума** будет

$$I = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2.$$

При сложении некогерентных волн разность фаз $\Delta\varphi$ хаотически меняется с течением времени,

$$\langle \cos \Delta\varphi \rangle = 0.$$

Тогда из (2) следует

$$E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2,$$

$$I = I_1 + I_2,$$

т.е. усиление суммарной интенсивности не происходит.

3. Оптическая разность хода. Условия максимума и минимума для оптической разности хода

Световым лучом называется линия, вдоль которой распространяется энергия световой волны.

Оптический путь светового луча – произведение геометрического пути s на абсолютный показатель преломления среды n :

$$l = s n.$$

Для вакуума и воздуха $n = 1$, поэтому оптический и геометрический пути светового луча для данных сред совпадают.

Оптической разностью хода двух лучей называется величина равная разности их оптических путей:

$$\Delta = s_2 n_2 - s_1 n_1.$$

Получим связь оптической разности хода Δ с разностью фаз $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \omega \left(\frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right),$$

$$v_1 = \frac{c}{n_1}, \quad v_2 = \frac{c}{n_2}, \quad \omega = 2\pi\nu, \quad \lambda = \frac{c}{\nu},$$

где λ – длина волны света в вакууме.

Тогда

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\nu}{c} (s_2 n_2 - s_1 n_1) = \frac{2\pi}{\lambda} (s_2 n_2 - s_1 n_1).$$

В результате **связь оптической разности хода Δ с разностью фаз $\Delta\varphi$** определяется соотношением

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

Условие максимума интерференции для оптической разности хода получаем, приравнявая (3) и (5),

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad (6)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Таким образом, **интерференционный максимум** наблюдается, если **оптическая разность хода интерферирующих световых волн равна четному числу длин полуволн или целому числу длин волн.**

Условие минимума интерференции для оптической разности хода получаем, приравнявая (4) и (5),

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \quad (7)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Таким образом, интерференционный минимум наблюдается, если оптическая разность хода интерферирующих световых волн равна нечетному числу длин полуволн или нецелому числу длин волн.

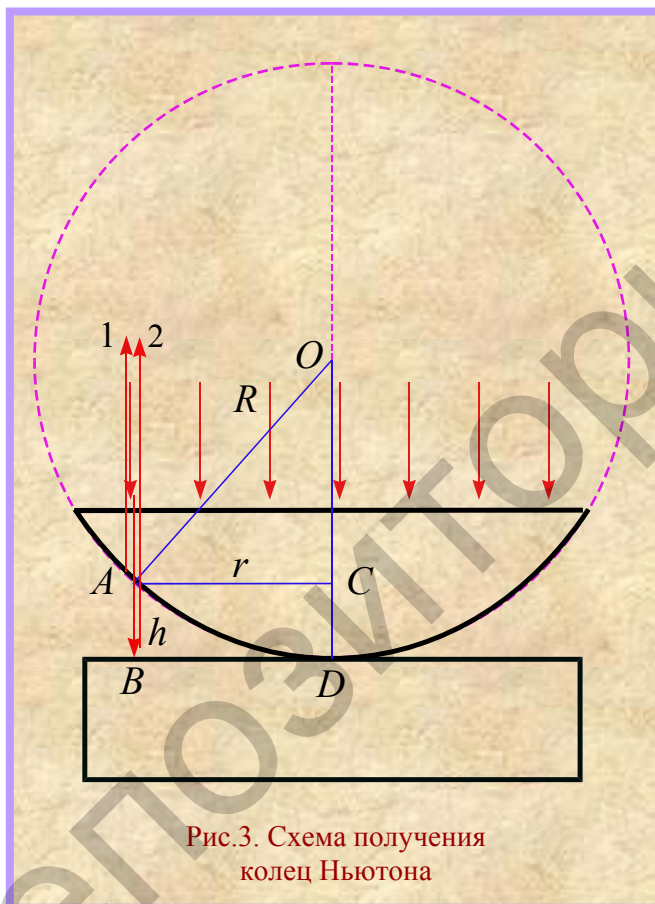
4. Кольца Ньютона – интерференционные полосы равной толщины

Интерференционную картину в виде колец Ньютона получают с помощью плосковыпуклой линзы большого радиуса кривизны, соприкасающейся выпуклой поверхностью с хорошо отполированной плоскопараллельной пластинкой так, что между ними образуется воздушный клин переменной толщины.

Пусть пучок параллельных монохроматических лучей падает сверху перпендикулярно плоской поверхности линзы (рис.3). В точке A луч частично отражается, а частично проходит в воздушный клин практически вертикально из-за малой кривизны линзы. Отражаясь в точке B , луч 2 возвращается обратно и интерферирует с лучом 1, отраженным в точке A . Оптическая разность хода интерферирующих лучей будет

$$\Delta = 2AB \cdot n + \frac{\lambda}{2}.$$

Прибавление половины длины волны связано с тем, что при отражении волны в точке B от оптически более плотной среды фаза волны меняется на противоположную (на величину равную π), в результате чего происходит потеря половины длины волны и возникает добавочная разность хода. Отражение волны в точке A происходит от оптически менее плотной среды и потому фаза волны не изменяется.



Из двух сред данная среда является оптически более плотной, если ее показатель преломления больше, чем для другой среды.

Так как расстояние AB соответствует толщине воздушной прослойки h , то

$$\Delta = 2h \cdot n + \frac{\lambda}{2}, \quad (8)$$

Из (7) следует, что **минимум интенсивности** в отраженном свете возникает в тех местах, где оптическая разность хода равна нечетному числу полуволин

$$2h + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{или}$$
$$h = m \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (9)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

В соответствии с условием (6) для **максимума интенсивности** при наблюдении в отраженном свете толщина воздушной прослойки будет

$$h = (2m - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (10)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Так как места с одинаковой толщиной h воздушной прослойки образуют концентрические окружности с центром в точке соприкосновения линзы и пластинки, то интерференционные полосы имеют форму колец (рис.4) и представляют собой

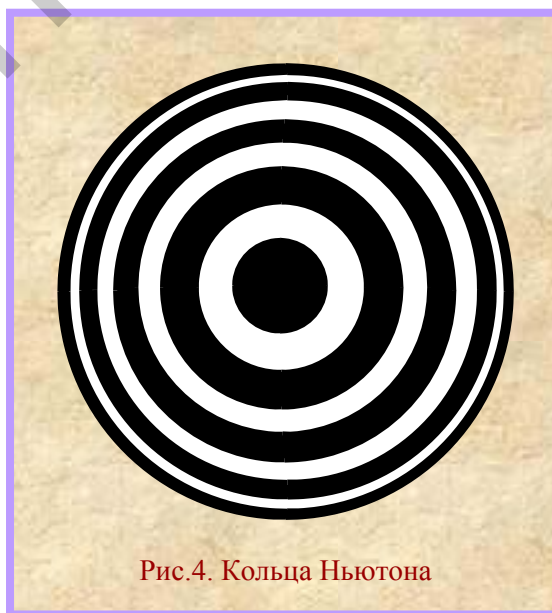


Рис.4. Кольца Ньютона

интерференционные полосы равной толщины.

Полосы равной толщины возникают также от пластинки переменной толщины (клина).

В центре колец в отраженном свете наблюдается темное пятно, потому что геометрическая разность хода в точке соприкосновения линзы и пластинки много меньше

длины волны света и лишь теряется $\frac{\lambda}{2}$ при отражении от пластинки, что согласно (7) и приводит к условию минимума. Темное кольцо окружено системой чередующихся светлых и темных колец, ширина и интенсивность которых постепенно убывает по мере удаления от центрального пятна.

При наблюдении колец Ньютона в проходящем свете потери полуволны на пластинке не происходит, условия максимума и минимума соответствуют условиям минимума и максимума в отраженном свете. Наблюдается следующая картина: центральное пятно светлое, следующее кольцо темное и т.д.

Если наблюдения проводятся в белом свете, то появляется система окрашенных (радужных) колец, так как каждому значению длины волны λ соответствует своя толщина воздушной прослойки и свой радиус кольца, причем каждое кольцо начинается от центра фиолетовым и заканчивается красным цветом.

В приведенных рассуждениях пренебрегали влиянием света, отражающегося от верхней плоской поверхности линзы и нижней поверхности пластинки, потому что толщина центральной части линзы и пластинки намного порядков больше толщины воздушного зазора вблизи точки D . Поэтому разность хода между световыми волнами, отражающимися от верхней и нижней поверхностей линзы и пластинки столь велики, что интерференция этих волн практически невозможна.

Рассматриваемые кольцевые интерференционные полосы впервые наблюдались в середине 18 века Р.Гуком (1635-1703). И.Ньютон (1643-1727) установил связь между радиусом колец и радиусом кривизны линзы. В 19 веке Т.Юнг (1773-1829) объяснил природу этих колец, называемых теперь кольцами Ньютона, и использовал их для определения длины волны интерферирующего света.

Описанная выше установка представляет собой простейший интерферометр. Правильная форма колец Ньютона легко искажается даже при незначительных дефектах (размером $\sim \lambda/2$) обработки выпуклой поверхности линзы и верхней поверхности пластинки. Поэтому наблюдение формы колец Ньютона позволяет быстро и точно контролировать качество шлифовки плоских пластин и линз.

5. Определение длины волны монохроматического света по измерениям радиусов колец Ньютона в отраженном свете

Найдем связь длины волны λ , радиуса r кольца Ньютона и радиуса кривизны R линзы.

Рассмотрим прямоугольный треугольник AOC (рис.3), где $AO = R$ – радиус кривизны линзы, $AC = BD = r$ – радиус кольца, $AB = h$ – толщина воздушной прослойки.

По теореме Пифагора имеем:

$$r^2 = R^2 - (R - h)^2 = 2Rh - h^2.$$

Так как по условию $h \ll R$, то $h^2 \ll 2Rh$ и формула приобретает вид

$$r^2 = 2Rh.$$

Тогда выражение для квадрата радиуса m -го **темного** кольца (минимум) с учетом (9) для h примет вид

$$r_m^2 = 2R \cdot \frac{m\lambda}{2} = mR\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Радиус n -го темного кольца будет

$$r_n^2 = nR\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

С учетом (10) аналогично получаем выражение для вычисления **радиуса светлых колец**

$$r_m^2 = R(2m - 1)\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

Формулы (11) и (12) позволяют найти длины волн монохроматического света по измеренным радиусам темных колец Ньютона и известному радиусу кривизны линзы R .

Алгоритм вычисления удобно представить в виде

$$\lambda = \frac{r_n^2 - r_m^2}{(n - m)R}$$

или

$$\lambda = \frac{(r_n - r_m)(r_n + r_m)}{(n - m)R}. \quad (14)$$

Легко получить из формулы (13) аналогичное выражение для светлых колец.

Поскольку в лабораторной работе диаметры колец d измеряются в делениях шкалы окулярного микрометра с ценой деления k , то правую часть соотношения (14) надо умножить на k^2 .

Окончательно **рабочая формула** для **расчета длины волны** монохроматического света по измеренным диаметрам **темных** колец Ньютона в отраженном свете примет вид

$$\lambda = \frac{(d_n - d_m)(d_n + d_m)k^2}{4(n - m)R}. \quad (15)$$

При измерениях диаметров темных колец для **уменьшения ошибки**, обусловленной мертвым ходом червячного механизма, необходимо производить наведение двойной нити микрометра на темное кольцо путем **ввинчивания барабанчика винта микрометра**.

С целью уменьшения погрешности при вычислениях в формуле (15) **следует брать диаметры колец удаленных друг от друга**, т.е. $n - m \geq 4$.

Радиус кривизны линзы R либо приводится в паспорте прибора завода-изготовителя, либо очень точно измеряется с помощью сферометра [7], причем относительная погрешность $\varepsilon_R < 0,01\%$.

6. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить инструкцию на рабочем месте.
2. Измерить диаметры темных колец Ньютона в отраженном свете.
3. Вычислить длину волны света, ее абсолютную и относительную погрешности.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое свет и в чём состоит его двойственная природа? Назовите корпускулярные и волновые свойства света.
2. Записать уравнения электромагнитной волны и указать смысл входящих в них величин.
3. Почему вектор напряжённости электрического поля называют световым вектором?
4. Что такое интерференция света?
5. Какие волны называются когерентными; монохроматическими? Почему монохромность света есть необходимое, но недостаточное условие когерентности волн?
6. Почему интерференция волн отчётливо наблюдается, только если колебания векторов \vec{E} двух волн происходят вдоль одного направления?

7. Что называется геометрической и оптической разностью хода световых лучей?
8. Как меняется фаза и оптическая длина пути при отражении света от оптически более плотной среды?
9. Записать условия максимума и минимума интенсивности света (освещённости) при интерференции для разности фаз и оптической разности хода.
10. Вывести рабочую формулу для определения длины монохроматической световой волны с помощью колец Ньютона.
11. Почему в центре интерференционной картины появляется тёмное пятно при наблюдении колец Ньютона в проходящем свете?
12. Как изменится интерференционная картина при наблюдении колец Ньютона в проходящем свете?
13. Какой вид приобретают кольца Ньютона при наблюдении в белом свете?
14. Что произойдёт с кольцами Ньютона, если вместо воздушной прослойки между линзой и плоскопараллельной пластинкой будет среда с другим показателем преломления?
15. Почему не рассматривается интерференция волн, отражённых от нижней поверхности пластинки и верхней поверхности линзы?

Литература

1. Самойлюкович В.А., Тижовка Ж.С. Методические указания к лабораторной работе «Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона». – Мн.: БПИ, 1985.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Т.3. – М., 1979, гл.5
3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т.3. – М., 1972, гл.4.
4. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. – М. 1978.
5. Годжаев Н.М. Оптика. – М., 1977.
6. Трофимова Т.И. Курс физики. – М., 1985, гл.22.
7. Физический практикум. Лаборатория оптики. Ч.1. – М.: Станкин, 1972, с.136-156.