

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ
для студентов всех специальностей

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ
БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Казань
2012

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Свет представляет собой сложное явление: в одних случаях он ведет себя как электромагнитная волна, в других — как поток частиц, называемых фотонами. Для объяснения большинства оптических явлений вполне достаточно волновых представлений, с помощью которых объясняются интерференция, дифракция и поляризация света.

Согласно теории Максвелла, световые волны являются электромагнитными и представляют собой взаимосвязанные переменные электрические и магнитные поля, распространяющиеся в вакууме со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Ориентация векторов напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей и направление распространения волны x показаны на рис.1.

Направления \vec{E} , \vec{H} и x взаимно перпендикулярны, что позволяет отнести электромагнитные волны к поперечным. Электромагнитная волна, описывается уравнениями :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx), \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kx)$$

где \vec{E} и \vec{H} — вектора напряженности электрического и магнитного полей, соответственно; \vec{E}_0 и \vec{H}_0 — амплитудные значения этих векторов;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ — циклическая частота; T — период колебания, т.е. промежутки

времени, в течение которого происходит одно полное колебание; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ —

волновое число; kx — начальная фаза колебаний; λ — длина волны, т.е. расстояние, которое проходит волна за один период.

Оптической длиной пути называется произведение показателя преломления n на геометрическую длину пути x :

$$L = nx.$$

Человеческий глаз способен воспринимать электромагнитные волны с длиной волны приблизительно от 0,4 до 0,75 мкм (видимая область спектра). Видимое излучение с различной длиной волны вызывает в глазу качественно различное восприятие. Это различие и называется цветом света. Излучение может быть простым (монохроматическим) и сложным. Монохроматическим называется излучение какой-либо одной длины волны. Белый свет представляет собой наложение монохроматических волн с длинами волн от 0,4 до 0,75 мкм. Уравнение световой волны можно записать в общем виде:

$$Y = A \cdot \text{Cos}(\omega t - kx),$$

подразумевая под Y мгновенные значения E и H , а под A их амплитудные значения. Отметим важную взаимосвязь между амплитудой A и интенсивностью света J : интенсивность света J пропорциональна квадрату амплитуды световой волны A

$$J \sim A^2.$$

Общие положения теории интерференции

Интерференция — это явление усиления или ослабления волн, которое происходит в результате их наложения. Интерферировать могут только когерентные волны. Волны называются когерентными, если частоты их равны, а разность фаз постоянна по времени. Источники, испускающие когерентные волны, также называются когерентными.

Особо важный для оптики случай интерференции — наложение двух когерентных световых волн, распространяющихся вдоль одного направления. Пусть будет два когерентных (точечных) источника света S_1 и S_2 , испускающих такие световые волны (рис.2).

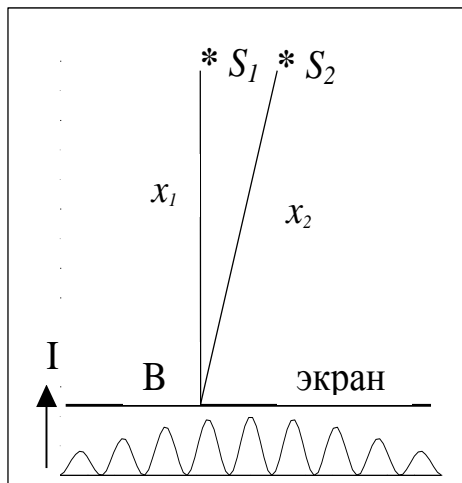


Рис.2

Уравнения этих световых волн:

$$Y_1 = A_1 \text{Cos}(\omega t - kx_1);$$

$$Y_2 = A_2 \text{Cos}(\omega t - kx_2),$$

где x_1, x_2 — расстояния от источника S_1 и S_2 до какой-то точки экрана. Рассмотрим результат сложения этих волн в точке В экрана $Y = Y_1 + Y_2$.

Из курса механики известно, что в этом случае результирующее колебание будет происходить также по закону косинуса, т.е.

$$Y = A \text{Cos}(\omega t - \varphi),$$

$$\text{где } A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \text{Cos } \kappa(x_2 - x_1) \quad (1),$$

а $\kappa(x_2 - x_1) = \varphi$ разность фаз слагаемых колебаний. Учитывая, что $\kappa = 2\pi/\lambda$ имеем формулу, связывающую разность фаз φ и разность хода лучей x (в нашем случае это просто разность геометрических длин $|S_2B| - |S_1B|$).

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

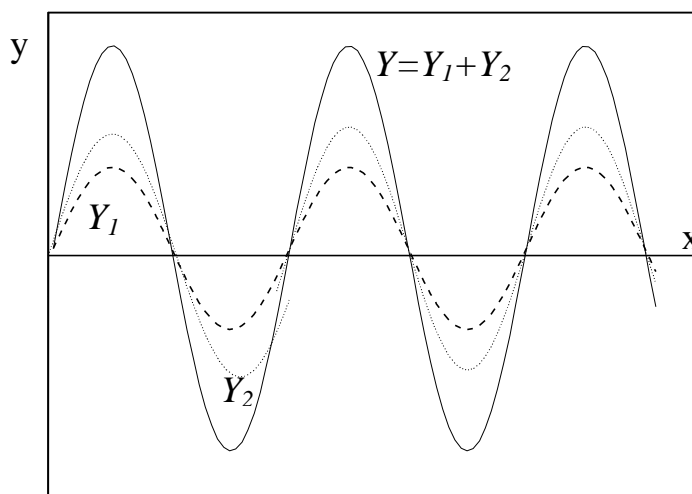
Поскольку интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды световой волны, выражение (1) сразу же позволяет говорить о

распределении интенсивности света на экране. Как видно, результат зависит от аргумента косинуса и здесь возможно несколько частных случаев:

1. Если $\varphi = \kappa(x_2 - x_1) = 2m\pi$, $m = 0, 1, 2, \dots$, то выражение (1) записывается $A^2 = (A_1 + A_2)^2$, т.е. амплитуда результирующей волны увеличивается и, следовательно, волны усиливают друг друга. С учетом формулы (2) условие усиления света или условие максимума света можно записать и через разность хода x : $x = m\lambda$. Условие $x = m\lambda$ означает, что разность хода содержит целое число длин волн и поэтому волны идут точно в фазе, что приводит к усилению света (рис.3, иллюстрирующий случай $x = \lambda$).

2. Если $\varphi = \kappa(x_2 - x_1) = (2m + 1)\pi$, $m = 0, 1, 2, \dots$, то $A^2 = (A_1 - A_2)^2$, т.е. волны ослабляют друг друга. Через разность хода условие ослабления волн или условие минимума света записывается в виде: $x = (m + 1/2)\lambda$. Разность хода x содержит полуцелое число длин волн и поэтому волны, встречаясь, идут в противофазе, ослабляя друг друга. На рис.4 представлен случай, когда $x = \lambda/2$.

Если разность фаз $\varphi = \kappa(x_2 - x_1)$ меняется хаотически, то среднее



значение $\text{Cos } \kappa(x_2 - x_1)$ будет равно нулю. Поэтому $A^2 = A_1^2 + A_2^2$ или $J = J_1 + J_2$ т.е. в любой точке пространства интенсивность результирующей световой волны будет одинаковой и интерференция не наблюдается.

Рис.3

До сих пор рассматривалась интерференция световых волн, распространяющихся в одной среде. Если интерферирующие волны распространяются в средах с различным показателем преломления, то необходимо использовать понятие оптической длины пути L , и, соответственно, оптической разности хода двух лучей L , тем самым

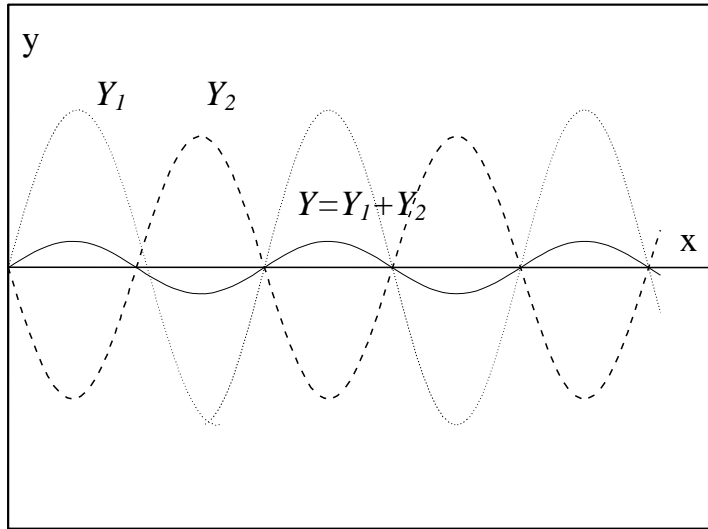


Рис.4

учитывая оптические свойства сред. Оптической длиной пути называется произведение показателя преломления n на геометрическую длину x ($L=nx$). Между оптической разностью хода: $L=L_2-L_1$ и разностью фаз интерферирующих волн существует связь, аналогичная выражению (2) $\varphi = 2\pi/\lambda L$. С учетом вышесказанного можно записать условие интерференции следующим

образом.

1. Условие усиления света:

а) через разность хода $x = m\lambda$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ (при распространении волн в одной среде).

б) через оптическую разность хода $L = m\lambda_0$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ при распространении света в разных оптических средах;

в) через разность фаз $\varphi = 2m\pi$, $m = 0, 1, 2$.

2. Условие ослабления света:

а) через разность хода

$$x = (m + 1/2) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots,$$

б) через оптическую разность хода

$$L = (m + 1/2) \lambda_0, \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots, \quad \lambda_0 = \text{длина волны в вакууме}$$

в) через разность фаз

$$\varphi = (2m + 1) \pi, \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Если в область наложения световых волн поместить экран (рис.2), то на нем будет видна интерференционная картина, которая имеет вид чередующихся светлых и темных полос. Это обусловлено тем, что при

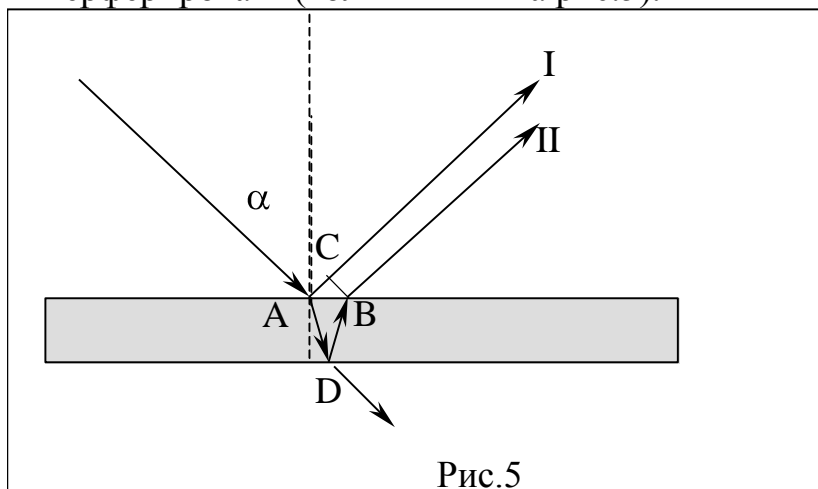
перемещении по экрану разность хода меняется, что приводит к чередованию областей усиления и ослабления света.

При интерференции идеальных когерентных волн интерференционная картина по всему экрану имеет одинаковую контрастность. В действительности же контрастность интерференционных полос не одинакова. Это объясняется тем, что интерферирующие волны не строго монохроматичны, т.е. длины этих волн находятся в некотором интервале.

Способны получения когерентных волн в оптике сводятся к разделению первичного светового пучка на два с последующим их соединением. Это имеет место, например, при отражении света от верхней и нижней поверхностей тонких пленок.

Полосы равной толщины и равного наклона

При падении световой волны на тонкую прозрачную пластинку или пленку происходит отражение от обеих поверхностей пластинки. В результате возникают когерентные световые волны, которые могут интерферировать (волны I и II на рис.5).



Оптическая разность хода лучей I и II равна
 $L = (AD + DB)n - AC + \lambda_0/2$ (3)
 где d — толщина пластинки, α — угол падения, n — показатель преломления пластинки (вывод формулы дается в

лекциях). Дополнительная разность хода $\lambda_0/2$ связана с отражением света от оптически более плотной среды, т.е. с изменением при отражении фазы волны на π . Если на пути пучков I и II поставить собирающую линзу, то они сойдутся в какой-либо точке фокальной плоскости и будут интерферировать. Результат интерференции зависит от толщины пластинки и угла падения лучей. Интерференционная картина обычно наблюдается в виде интерференционных полос двух типов.

Полосы равной толщины — это места одинаковой освещенности, соответствующие одинаковым значениям толщины пластинки d , при неизменности значения угла падения лучей α .

Полосы равного наклона — это геометрические места точек или места одинаковой освещенности, соответствующие одинаковым значениям углов падения α при неизменном значении толщины пластинки d .

Применение интерференции

На явления интерференции основано действие оптических приборов, называемых интерферометрами. Интерферометры используются для измерения с высокой точностью длины световых волн, показателей преломления вещества, толщины тонких покрытий, кривизны сферических поверхностей, для исследования качества обработки поверхностей и т.д.

Явление интерференции лежит в основе работы лазеров, используется в метрологии для определения эталона единицы длины, точного определения скорости света. Для уменьшения потерь света при отражении от поверхности линз и улучшения качества изображения широкое распространение получила «просветленная» оптика, где явление интерференции используется для гашения отраженного света.

1. Что такое свет ?
2. Запишите уравнение электромагнитной волны и дайте определение всех величин, входящих в уравнение.
3. Что называется оптической длиной пути ?
4. Какой свет называется монохроматическим ?
5. Как связаны между собой амплитуда колебаний светового вектора и интенсивность света?
6. Что называется интерференцией ?
7. Какие волны называются когерентными ?
8. Запишите условие усиления и ослабления света через разность фаз и разность хода. Поясните графически.
9. Как связаны между собой разность фаз и разность хода ?
10. В каком случае рассматривается оптическая разность хода ?
11. Что такое «полосы равной толщины» и «равного наклона» ?
12. Каковы области применения интерференции света ?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Целью работы является наблюдение и изучение интерференционной картины, полученной при прохождении света через бипризму Френеля, и расчет длины волны монохроматического света.

Бипризма Френеля представляет собой две призмы с малыми преломляющими углами (порядка 30°), сложенные основаниями. Падающий на грани АВ и ВС бипризмы пучок света от щели S (рис.6) будет дважды преломляться на границах ее раздела с воздухом. В результате преломления возникнут два расходящихся конуса лучей, которые будут казаться глазу выходящими из точек S_1 и S_2 . Эти источники являются мнимыми изображениями источника S, а значит лучи, исходящие из S_1 и S_2 , будут всегда иметь одинаковые фазы, т.е. будут когерентными. Если в область, где конусы лучей перекрываются (эта область на рис. показана штриховкой), поставить экран, то на нем можно увидеть устойчивую во времени картину интерференции.

Обычно в качестве источника S используют ярко освещенную узкую прямоугольную щель, которую располагают параллельно ребру бипризмы. Если источник испускает монохроматический свет (это обычно достигается с помощью светофильтра, пропускающего излучение лишь с определенной длиной волны λ), то картина интерференции будет выглядеть как совокупность светлых и темных полос, причем светлые полосы будут окрашены в цвет пропускаемых фильтром лучей.

В центре поля зрения мы будем наблюдать наиболее яркий максимум нулевого порядка ($m = 0$), справа и слева от него менее яркие два максимума первого порядка ($m = 1$), затем еще менее яркие два максимума второго порядка ($m = 2$) и т.д. При хорошей установке можно одновременно наблюдать 10—12 максимумов разных порядков, разделенных темными полосами.

При отсутствии фильтра, т.е. в белом свете, полосы будут радужно

окрашены, так как места максимумов для лучей разной длины волны (разного

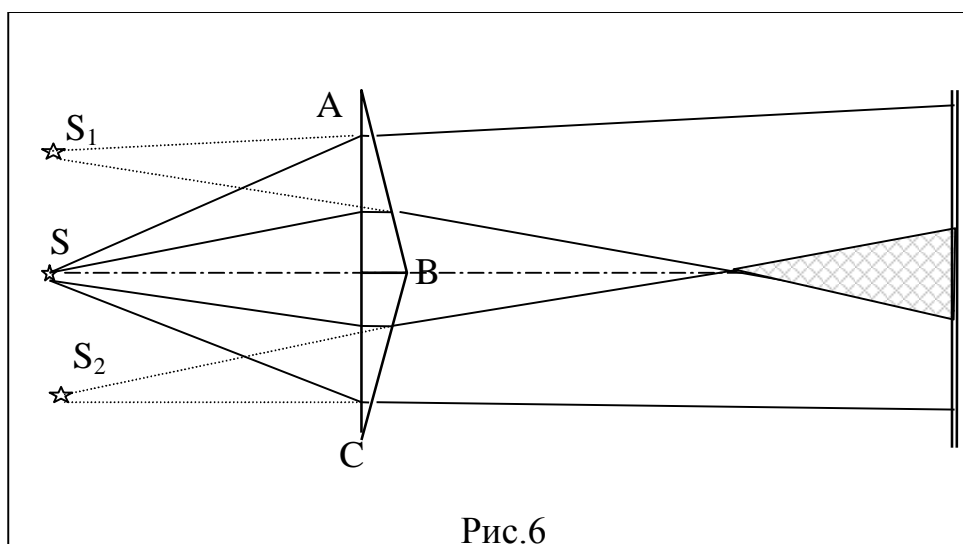


Рис.6

цвета) будут пространственно разделены (это вытекает из условий интерференции).

Расчет интерференционной картины. Пусть S_1 и S_2 — когерентных источника света (рис.7), полученных указанным способом. Обозначим расстояние между источниками через d , а расстояние до экрана, где наблюдается интерференция, через L .

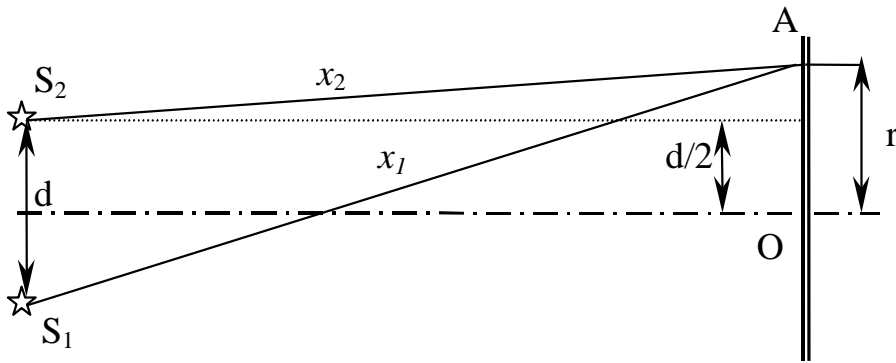


Рис.7

Очевидно, в центральную точку экрана O оба луча придут с одинаковыми фазами, так как они пройдут до точки O одинаковые пути. Следовательно, в точке O мы будем наблюдать соответствующий нулевой максимум ($m = 0$). Для любой другой точки экрана, например, для точки A , отстоящей от точки O на расстоянии r , геометрическая разность хода лучей $x_1 - x_2$ уже не будет равна нулю, и в зависимости от ее величины лучи могут друг друга не только усиливать, но и ослаблять.

Из рис.7 можно определить разность хода $x_1 - x_2$ двух интерферирующих лучей для точки A :

$$\text{откуда } x_1 - x_2 = 2rd \text{ или } (x_1 - x_2)(x_1 + x_2) = 2rd.$$

Так как расстояние между S_1 и S_2 очень мало по сравнению с L , а картина наблюдается при малом r , то приближенно можно положить $x_1 + x_2 \sim 2L$,

$$\text{тогда } x_1 - x_2 = rd/L \quad (4)$$

В соответствии с общим принципом интерференции максимумы освещенности будут наблюдаться для точек экрана, в которых выполняется условие

$$x_1 - x_2 = \frac{rd}{L} = m\lambda \quad (5)$$

Минимумы будут получаться при условии

$$x_1 - x_2 = \frac{rd}{L} = (2m + 1) \lambda/2 \quad (6)$$

Найдем расстояние между серединами двух соседних максимумов, т.е. максимумов, порядки которых m и $m+1$. Из (5) имеем:

$$r_m = m\lambda \frac{L}{d} \text{ и } r_{m+1} = (m+1)\lambda \frac{L}{d}$$

Отсюда искомое расстояние

$$r_{m+1} - r_m = \delta = \frac{L}{d} \lambda \quad (7)$$

Отсюда видно, что если величины δ , L и d известны, то можно определить длину волны света λ :

$$\lambda = \frac{d}{L} \delta \quad (8)$$

На этом и основан предлагаемый метод определения длины волны света.

В нашей установке, схема которой представлена на рис.8, интерференция от бипризмы Френеля наблюдается глазом через микроскоп. В микроскопе имеется окулярная шкала, по которой можно отсчитывать расстояние δ между максимумами.

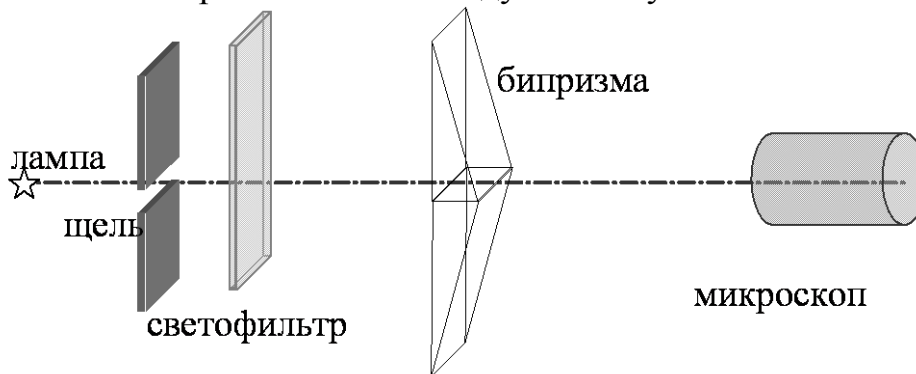


Рис.8

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Включить осветитель в сеть (220В). В микроскоп можно видеть интерференционную картину.
2. Поместить в паз красный светофильтр.
3. Вращая барабан окуляра микроскопа, совместить перекрестье линий, наблюдаемых в микроскопе, с серединой светлой полосы; снять отсчет со шкалы барабана (n_0). Вращая барабан, совместить перекрестье с серединой следующей светлой полосы; вновь снять

отсчет со шкалы барабана (n). Тогда расстояние между соседними максимумами можно подсчитать по формуле

$\delta = (n - n_0) 0,01$ мм (так как цена одного деления барабана равна 0,01 мм).

4. По формуле (8) рассчитать длину волны, считая $L = 750$ мм, $d = 0,6$ мм.
5. Сменить красный светофильтр на зеленый: проделать пункты 3-4 и подсчитать λ для зеленого цвета.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое свет ?
2. Запишите уравнение электромагнитной волны и дайте определение всех величин, входящих в уравнение.
3. Что называется оптической длиной пути ?
4. Какой свет называется монохроматическим ?
5. Как связаны между собой амплитуда колебаний светового вектора и интенсивность света?
6. Что называется интерференцией ?
7. Какие волны называются когерентными ?
8. Запишите условие усиления и ослабления света через разность фаз и разность хода. Поясните графически.
9. Как связаны между собой разность фаз и разность хода ?
10. В каком случае рассматривается оптическая разность хода ?
11. Что такое «полосы равной толщины» и «равного наклона» ?
12. Каковы области применения интерференции света ?
13. Объясните принцип работы бипризмы
14. Почему преломляющий угол бипризмы имеет малое значение ,
15. Вывести рабочую формулу для определения длины волны света с помощью бипризмы
16. Какой вид имеет интерференционная картина в монохроматическом и белом свете ? Дать объяснение.
17. Как изменится расстояние между соседними максимумами в зависимости от цвета фильтра ?