

Интерференция света

Необходимая теория изложена в листках базового курса «Интерференция волн» и «Интерференция света».

Разность хода, максимумы и минимумы

ЗАДАЧА 1. Луч лазера с длиной волны λ расщепляется на два. Один луч проходит через прозрачную плёнку толщиной d_1 с показателем преломления n_1 , а другой — через плёнку толщиной d_2 с показателем преломления n_2 . Остальной путь, проходимый лучами, одинаков. Найдите разность фаз между лучами.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 d_1 - n_2 d_2) = \delta$$

ЗАДАЧА 2. Стеклоплавильная поверхность покрыта тонкой плёнкой ацетона ($n = 1,25$). Сверху перпендикулярно поверхности падает белый свет. В отражённом свете полностью гасится свет с длиной волны $\lambda_1 = 600$ нм и максимально усиливается свет с $\lambda_2 = 700$ нм. Чему равна минимальная толщина плёнки?

$$d = 140 \text{ нм}$$

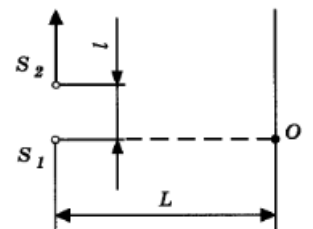
ЗАДАЧА 3. Две плоские монохроматические волны падают на экран почти перпендикулярно под малым углом α друг к другу. Длины волн одинаковы и равны λ . Найдите ширину интерференционных полос на экране.

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\alpha}$$

ЗАДАЧА 4. (МФТИ, 1987) Для уменьшения доли отражённого света от поверхности стекла на неё наносят тонкую плёнку, показатель преломления которой меньше показателя преломления стекла (просветление оптики). Какой наименьшей толщины плёнку с показателем преломления $n = 4/3$ надо нанести на поверхность стекла, чтобы при падении (нормально к поверхности) света, содержащего излучение двух длин волн с $\lambda_1 = 700$ нм и $\lambda_2 = 420$ нм, отражённый свет был максимально ослаблен для обеих длин волн?

$$d = 105 \text{ нм}$$

ЗАДАЧА 5. (МФТИ, 1980) От точечного монохроматического источника S_1 отодвигают точечный монохроматический источник S_2 (свет обоих источников имеет одну и ту же частоту) до тех пор, пока в точке O на экране, где наблюдается интерференция, не наступает потемнение. Расстояние между источниками при этом равно $l = 2$ мм (см. рисунок). Расстояние между источником S_1 и экраном $L = 9$ м. На сколько нужно передвинуть экран к источнику S_1 , чтобы в точке O снова возникло потемнение?

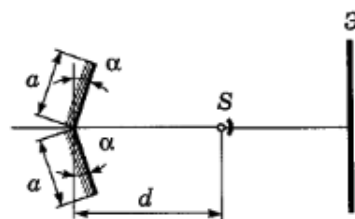


$$\Delta x = \frac{lL}{\lambda} = x$$

Классические интерференционные опыты

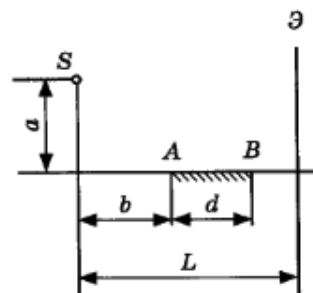
Их надо знать обязательно — зеркала Френеля, опыт Ллойда, билинза Бийе (два варианта) и бипризма Френеля.

ЗАДАЧА 6. (МФТИ, 1974) На рисунке изображена схема опыта Френеля по наблюдению интерференции. Два одинаковых плоских зеркала образуют угол $2\alpha = 0,1$ рад. Точечный источник S находится на биссектрисе угла на расстоянии $d = 20$ см от линии пересечения зеркал. При каком минимальном размере зеркал a на удалённом экране \mathcal{E} могут наблюдаться интерференционные полосы? Прямые лучи от источника на экран не попадают.



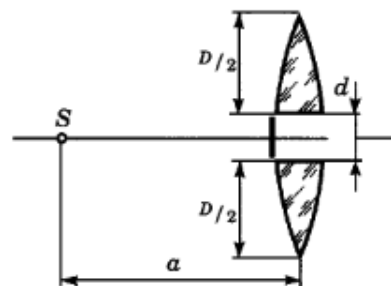
$$a \approx \sqrt{2d\alpha z} = v$$

ЗАДАЧА 7. (МФТИ, 1974) На рисунке изображена схема интерференционного опыта Ллойда. Точечный источник света S расположен на расстоянии $b = 20$ см от плоского зеркала AB на высоте $a = 10$ см над плоскостью зеркала. Длина зеркала $d = 10$ см. На расстоянии $L = 1$ м от источника расположен экран \mathcal{E} . Определить вертикальный размер интерференционной картины на экране.



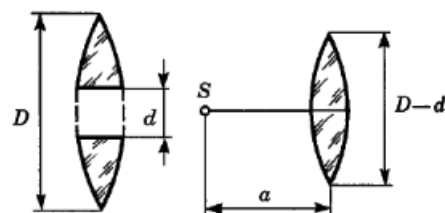
$$\Delta l = \frac{(p+q)q}{pTv} = \delta$$

ЗАДАЧА 8. (МФТИ, 1974) Собирающую линзу диаметром $D = 5$ см с фокусным расстоянием $f = 50$ см разрезали по диаметру пополам и половинки раздвинули на расстояние $d = 5$ мм (см. рисунок). Точечный источник света S расположен на расстоянии $a = 1$ м от линзы. На каком минимальном расстоянии от линзы можно наблюдать интерференционную картину? Щель между половинками линзы закрыта.



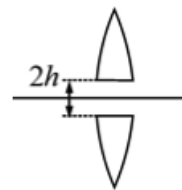
$$\Delta l \approx \frac{pv - (f-v)(p+d)}{(p+d)fv} = l$$

ЗАДАЧА 9. (МФТИ, 1974) Из собирающей линзы диаметром $D = 5$ см с фокусным расстоянием $f = 50$ см вырезана полоса шириной $d = 5$ мм, а оставшиеся части сдвинуты вплотную (см. рисунок). На расстоянии $a = 75$ см от линзы расположен точечный источник света S . На каком максимальном расстоянии от линзы можно наблюдать интерференционную картину?



$$\Delta l = \frac{pv + (f-v)(p-d)}{(p-d)fv} = l$$

ЗАДАЧА 10. («Курчатов», 2014, 11) Из тонкой собирающей линзы с фокусным расстоянием $f = 15$ см вырезали центральную часть шириной $2h = 2$ мм (см. рисунок), а затем симметрично сдвинули оставшиеся части до соприкосновения, изготовив так называемую «билинзу Бийе». Точечный источник света с длиной волны $\lambda = 711$ нм поместили на расстоянии $a = 20$ см от билинзы на её оси симметрии.



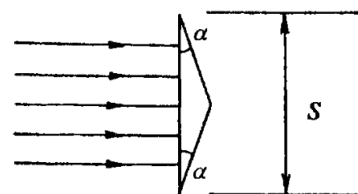
(1) Где находятся изображения, даваемые билинзой? Сделайте построение хода лучей и определите расстояния от изображений до линзы и до её оси.

(2) Каков будет период интерференционных полос в центре экрана, поставленного в фокальной плоскости билинзы? Угол φ схождения интерферирующих лучей на экране можно считать малым, так что $\sin \varphi \approx \varphi$.

(3) Оцените число N интерференционных полос, наблюдаемых на этом экране.

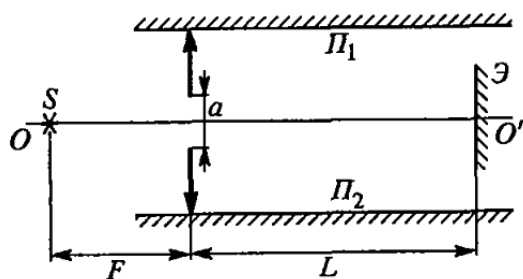
$$N \approx 1 + \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\lambda}} = N(\lambda) \quad ; \quad \text{при } \lambda \approx \frac{4\sqrt{2}}{f} = \lambda \quad ; \quad \text{при } \lambda = \frac{f-v}{f} = H \quad ; \quad \text{при } \lambda = \frac{f-v}{f} = q \quad (1)$$

ЗАДАЧА 11. (МФТИ, 1991) При нормальном падении света на бипризму Френеля (см. рисунок) пучки света, преломлённые каждой из половинок бипризмы, интерферируют между собой. На каком максимальном расстоянии от бипризмы ещё будет наблюдаться интерференционная картина? Расстояние между вершинами бипризмы $S = 4$ см, показатель преломления материала бипризмы $n = 1,4$, преломляющий угол $\alpha = 10^{-3}$ рад. Считать $\alpha \approx \sin \alpha \approx \tan \alpha$.



$$N \approx \frac{v(1-u)\varepsilon}{S} = T$$

ЗАДАЧА 12. (МФТИ, 1996) Тонкая собирающая линза диаметром $D = 5$ см с фокусным расстоянием $F = 50$ см разрезана по диаметру, и её половинки раздвинуты симметрично относительно её главной оптической оси OO' на расстояние $a = 1$ см. Сверху и снизу половинки линзы ограничены двумя зеркальными полуплоскостями Π_1 и Π_2 , параллельными оси OO' и друг другу. В фокальной плоскости линзы на оси OO' расположен точечный монохроматический источник света S (см. рисунок).

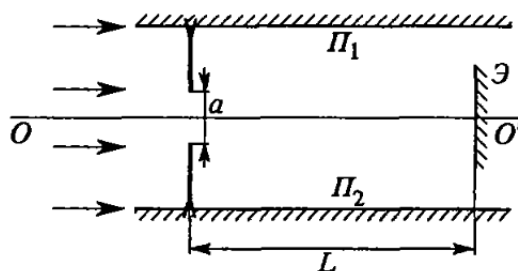


$$N \approx \frac{v}{\lambda(v+D)} = T \quad ; \quad \text{при } \lambda = 0,7 \mu\text{m} = \frac{D}{v} \approx \lambda \quad (1)$$

1) Найти угол между пучками лучей, вышедших из половинок линзы.

2) При каком минимальном расстоянии L в центре экрана \mathcal{E} (около оси OO') можно наблюдать интерференционную картину от лучей, предварительно прошедших половинки линзы?

ЗАДАЧА 13. (МФТИ, 1996) Тонкая рассеивающая линза диаметром $D = 7$ см с фокусным расстоянием $F = 70$ см разрезана по диаметру, и её половинки раздвинуты симметрично относительно её главной оптической оси OO' на расстояние $a = 1$ см. Сверху и снизу половинки линзы ограничены двумя зеркальными полуплоскостями Π_1 и Π_2 , параллельными оси OO' и друг другу. На половинки линзы падает параллельный пучок монохроматического света от удалённого источника S (см. рисунок).

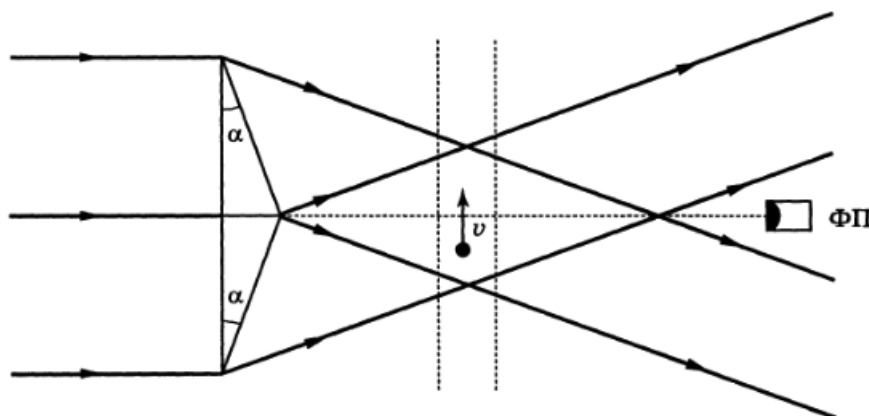


- 1) Найти расстояние между изображениями источника S в половинках линзы.
- 2) При каком минимальном расстоянии L в центре экрана \mathcal{E} (около оси OO') можно наблюдать интерференционную картину от лучей, предварительно прошедших половинки линзы?

$$x_2 - x_1 = \frac{D}{2} \left(\frac{L}{F} \right)^2$$

Интерференционные измерения

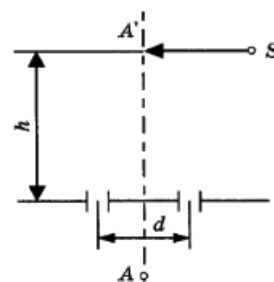
ЗАДАЧА 14. (Всеросс., 1993, финал, 11) Для измерения скорости мельчайших частиц, взвешенных в текущей жидкости, используется интерференционная схема, изображённая на рисунке.



Параллельный пучок света от лазера с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм падает на две одинаковые призмы, сложенные основаниями (бипризма). Преломляющий угол каждой из призм $\alpha = 5,7^\circ$, показатель преломления $n = 1,5$. После прохождения сквозь бипризму свет разбивается на два пучка, которые проходят сквозь кювету с жидкостью. Частицы, двигаясь вместе с жидкостью с некоторой скоростью v , рассеивают свет. Определите скорость частиц, если известно, что при регистрации рассеянного света фотоприёмником ФП частота колебаний тока фотоприёмника $f = 10$ кГц.

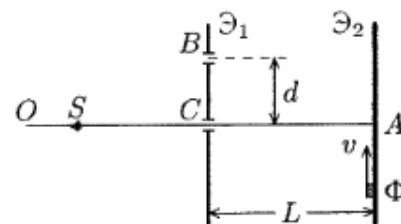
$$v = \frac{c}{n} \left(\frac{f \lambda}{c} \right)^2 = \lambda^2 f^2 \frac{c}{n^3}$$

Задача 15. (МФТИ, 1981) Точечный источник света S равномерно движется параллельно плоскости, в которой имеются два маленьких отверстия на расстоянии d друг от друга; расстояние от него до плоскости равно h (см. рисунок). Приёмник света A , расположенный на оси системы, регистрирует периодически изменяющуюся освещённость. Определите скорость v источника, если частота колебаний интенсивности $f = 15$ Гц, длина волны света $\lambda = 600$ нм, $d = 2$ мм, $h = 1$ м. Во время измерения источник движется вблизи оси системы.



$$\frac{v}{\lambda} \approx \frac{p}{f\lambda} = a$$

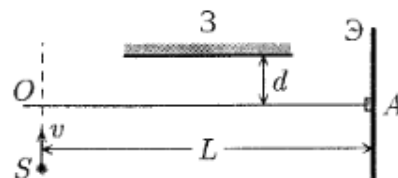
Задача 16. (МФТИ, 2003) Интерференционная схема, изображённая на рисунке, состоит из точечного монохроматического ($\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м) источника S и двух экранов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . В экране \mathcal{E}_1 сделаны два маленьких отверстия B и C , расстояние между которыми $d = 5$ мм. На экране \mathcal{E}_2 наблюдается интерференционная картина. Небольшой фотоприёмник Φ движется вдоль экрана к оси OA со скоростью $v = 0,4$ см/с. Определите частоту колебаний фототока приёмника, когда фотоприёмник будет вблизи точки A , если $L = 2$ м. Ось OA перпендикулярна экранам. Фототок приёмника пропорционален освещённости в месте нахождения приёмника.



Указание. При малых x полагать $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}$.

$$\frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\lambda} = f$$

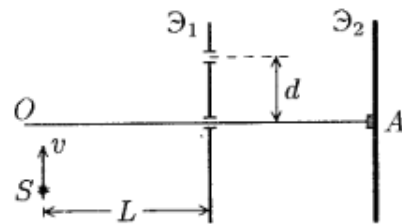
Задача 17. (МФТИ, 2003) Интерференционная схема состоит из плоского зеркала \mathcal{Z} , экрана \mathcal{E} , небольшого фотоприёмника A и точечного источника S , который движется со скоростью $v = 2$ см/с перпендикулярно оси OA (см. рисунок). Определите частоту колебаний фототока приёмника, когда источник света движется вблизи оси OA , если длина волны света $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м, $L = 1$ м, $d = 5$ мм. Фототок приёмника пропорционален освещённости в точке A .



Указание. При малых x полагать $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}$.

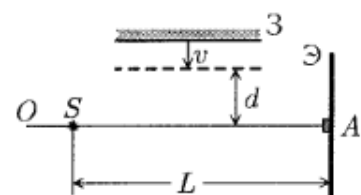
$$\frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\lambda} = f$$

ЗАДАЧА 18. (МФТИ, 2003) Интерференционная схема, изображённая на рисунке, состоит из точечного монохроматического ($\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м) источника S , который движется со скоростью $v = 4$ см/с перпендикулярно оси OA , и двух экранов. В экране \mathcal{E}_1 сделаны два маленьких отверстия, отстоящие друг от друга на расстоянии $d = 5$ мм. На экране \mathcal{E}_2 наблюдается интерференционная картина. В центре экрана на \mathcal{E}_2 расположен небольшой фотоприёмник A . Определите частоту колебаний фототока приёмника, когда источник света будет вблизи оси OA , если $L = 1$ м. Фототок приёмника пропорционален освещённости в точке A .



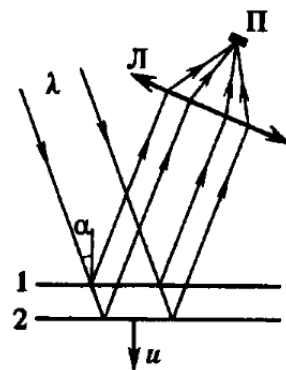
$$\frac{\partial I}{\partial p} = f$$

ЗАДАЧА 19. (МФТИ, 2003) Интерференционная схема включает в себя точечный монохроматический источник света S ($\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м), экран \mathcal{E} , небольшой фотоприёмник A и плоское зеркало \mathcal{Z} , которое движется со скоростью $v = 0,2$ см/с перпендикулярно оси OA (см. рисунок). Определите частоту колебаний фототока приёмника в момент, когда зеркало будет находиться на расстоянии $d = 5$ мм от оси OA , если $L = 2$ м. Фототок приёмника пропорционален освещённости в точке A .



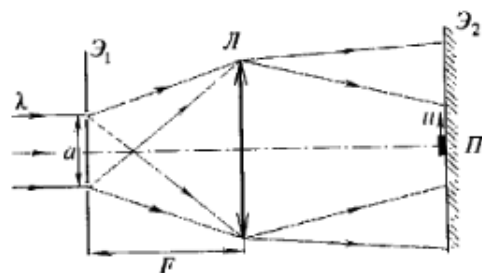
$$\frac{\partial I}{\partial p} = f$$

ЗАДАЧА 20. (МФТИ, 1993) В интерференционной схеме параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 5000$ Å падает под углом $\alpha = 60^\circ$ на систему из двух плоскопараллельных полупрозрачных зеркал 1 и 2 (см. рисунок). Часть светового пучка отражается от зеркала 1, оставшаяся часть, пройдя зеркало 1, частично отражается от зеркала 2 и, снова пройдя зеркало 1, вместе с пучком, отражённым от зеркала 1, с помощью собирающей линзы L фокусируется на приёмник Π , сигнал которого пропорционален интенсивности падающего на него света. Какова будет частота переменного сигнала, регистрируемого приёмником, в случае равномерного движения второго зеркала (относительно первого) со скоростью $u = 0,01$ см/с?



$$\frac{\partial I}{\partial p} = f$$

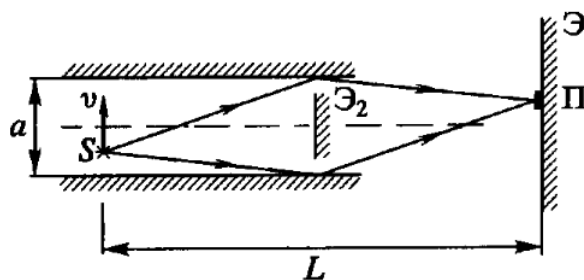
ЗАДАЧА 21. (МФТИ, 1993) Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ падает на экран \mathcal{E}_1 , расположенный в фокальной плоскости собирающей линзы L с фокусным расстоянием $F = 50 \text{ см}$ (см. рисунок). В экране \mathcal{E}_1 имеются две узкие симметричные щели (расположенные перпендикулярно плоскости рисунка), расстояние между которыми мало по сравнению с F и равно $a = 6 \text{ мм}$. На некотором расстоянии за линзой (в той области, где пучки от обеих щелей перекрываются) расположен экран \mathcal{E}_2 , на котором наблюдается интерференционная картина. В плоскости экрана \mathcal{E}_2 расположен приёмник Π , сигнал которого пропорционален интенсивности падающего на него света. Размер приёмника мал по сравнению с шириной интерференционных полос. При равномерном движении приёмника вдоль экрана (поперёк интерференционных полос) приёмник регистрирует переменный сигнал с частотой $f = 20 \text{ Гц}$. Определить скорость приёмника.



Указание. При $\beta \ll 1$ имеет место формула $\sqrt{1 + \beta} \approx 1 + \frac{1}{2}\beta$.

$$\frac{c}{v_{\text{мм}}} \Gamma = \frac{v}{F\lambda} = n$$

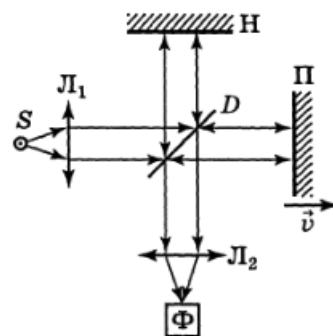
ЗАДАЧА 22. (МФТИ, 1993) Точечный источник монохроматического света S с длиной волны $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ расположен между двумя неподвижными плоскопараллельными зеркалами, расстояние между которыми $a = 3 \text{ см}$ (см. рисунок). На удалённом расстоянии $L = 1 \text{ м}$ от источника расположен экран \mathcal{E}_1 , на котором наблюдается интерференционная картина, создаваемая двумя пучками света, отражёнными от зеркал. Прямой пучок света от источника перекрывается экраном \mathcal{E}_2 . В плоскости экрана \mathcal{E}_1 (симметрично относительно зеркал) расположен приёмник Π , сигнал которого пропорционален интенсивности падающего на него света. Размер приёмника мал по сравнению с шириной интерференционных полос на экране \mathcal{E}_1 . Учитывая только однократные отражения света от зеркал, определить частоту переменного сигнала, регистрируемого приёмником, который возникает при движении источника в направлении, перпендикулярном зеркалам, со скоростью $v = 0,1 \text{ мм/с}$.



Указание. При $\beta \ll 1$ имеет место формула $\sqrt{1 + \beta} \approx 1 + \frac{1}{2}\beta$.

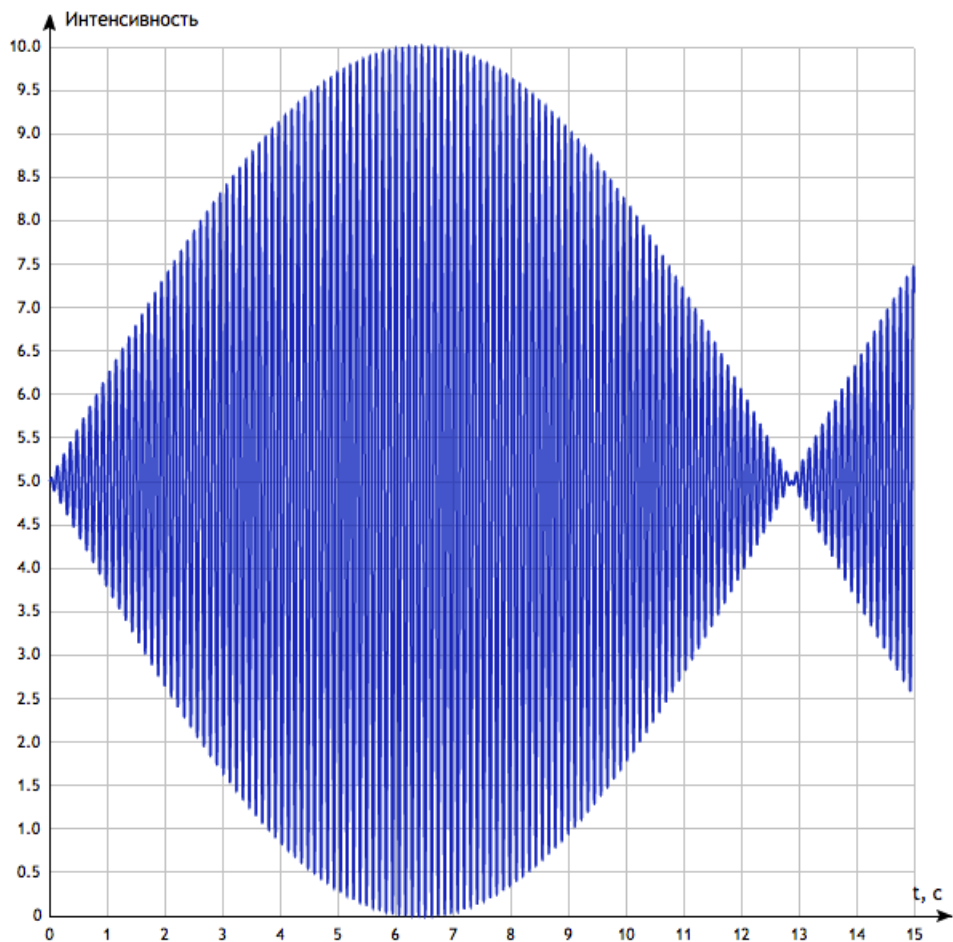
$$\Gamma_{\text{Г}} \text{ Г} = \frac{v\lambda}{a\lambda} = f$$

ЗАДАЧА 23. (Всеросс., 1998, финал, 11) Атомарный цезий при возбуждении испускает две монохроматические линии излучения с близкими длинами волн λ_1 и λ_2 . Для анализа этого излучения используется интерферометр Майкельсона (рисунок справа). Излучение цезиевой лампы S с помощью линзы L_1 в виде параллельного пучка направляется на полупрозрачное зеркало-делитель D . Это излучение частично отражается от делителя и падает на неподвижное зеркало H . Другая часть излучения проходит через делитель и падает на подвижное зеркало Π . После отражения от зеркал H и Π оба пучка вновь возвращаются к делителю D . Часть энергии этих пучков делитель направляет в сторону линзы L_2 , ко-



торая фокусирует оба пучка на поверхность катода фотоэлемента Φ . Сила тока фотоэлемента пропорциональна суммарной интенсивности падающего на него потока излучения.

Подвижное зеркало Π начинает медленно двигаться от делительной пластины с постоянной скоростью $v = 2,02 \cdot 10^{-6}$ м/с; при этом сила тока фотоэлемента изменяется так, как показано на рисунке ниже.

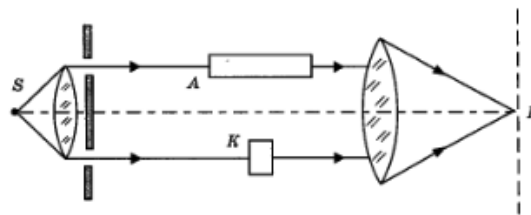


Определите:

- 1) среднюю длину волны излучения $\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$;
- 2) разность длин волн $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$;
- 3) отношение I_1/I_2 интенсивностей спектральных линий, испускаемых атомом цезия.

$\lambda \approx 456 \text{ нм}, \Delta\lambda \approx 4 \text{ нм}, I_1/I_2 \approx 1$

Задача 24. (МФТИ, 1991) Интерферометр Рэлея используется для точного измерения показателя преломления газов. Для этого на пути одного из интерферирующих лучей ставится кювета A прямоугольной формы и длиной $L = 10$ см с исследуемым газом, а на пути другого — стеклянный компенсатор K , с помощью которого добиваются, чтобы в центральном максимуме разность хода между интерферирующими лучами равнялась нулю (см. рисунок). Чему равен показатель преломления газообразного азота, если после замены в кювете воздуха на азот интерференционная картина в плоскости наблюдения P сместилась ровно на одну полосу в сторону, что соответствовало увеличению показателя преломления? Показатель преломления воздуха $n_0 = 1,000292$. Измерения проводились на длине волны света $\lambda = 500$ нм.



$$n = n_0 + \frac{\lambda}{L} \Delta n$$