

к центру новые интерференционные кольца, пока каждое из них не исчезнет в центре картины. Можно сказать, что при перемещении линзы непрерывно вверх пропадают кольца самых низких порядков интерференции и зарождаются кольца более высоких порядков. Таким путем удается наблюдать интерференцию все более и более высокого порядка. Понятно, что для этого требуется свет высокой степени монохроматичности.

Физо, впервые осуществивший подобный опыт, пользовался желтым светом натровой горелки (в опыте Физо интерференционные полосы получались между двумя плоскопараллельными пластинками). Физо заметил, что при увеличении числа полос N , прошедших в поле зрения, ухудшалась видимость полос. При $N = 490$ видимость достигала минимума, затем она опять улучшалась; при $N = 980$ полосы приобретали прежнюю отчетливость. Ближайший минимум наступал при $N = 1470$, следующий максимум при $N = 1960$ и т. д. Физо сумел заметить 52 таких максимума. На этом основании он пришел к заключению, что желтая линия натрия — двойная, т. е. состоит из двух близко расположенных спектральных линий с длинами волн λ и $\lambda' > \lambda$.

Легко найти расстояние между этими линиями $\lambda' - \lambda$. Как было показано в § 30, первое исчезновение видимости интерференционных полос происходит при условии $\lambda' - \lambda = \lambda/2N$. По наблюдениям Физо $N = 490$. Средняя длина волны желтой спектральной линии натрия $\approx 589,3$ нм. Поэтому $\lambda' - \lambda \approx 0,6$ нм.

Этот пример показывает, как интерференция высокого порядка может быть использована для разрешения сложных спектральных линий, состоящих из двух близко расположенных линий.

§ 34. Интерферометр Жамена

1. *Интерферометрами* называют оптические измерительные приборы, основанные на интерференции света. Они позволяют с высокой степенью точности измерять линейные и угловые расстояния, малые разности показателей преломления, исследовать структуру спектральных линий и т. п. Принцип действия интерферометров в основном один и тот же. Но в зависимости от предназначения им придают различные конструкции.

2. *Интерферометр Жамена* (1818—1886) состоит из двух толстых (толщина не менее 20 мм) плоскопараллельных пластин P_1 и P_2 , изготовленных из весьма однородного стекла и смонтированных на массивной плите (рис. 137). Для исследований в далекой ультрафиолетовой области спектра пластины изготавливаются из кварца или флюорита. Чтобы обе пластины имели строго одинаковую толщину, они вырезаются из одной и той же пластины. Пластины устанавливаются приблизительно под углом 45° к линии, соединяющей их центры. Угол между пластинами можно менять с помощью

специальных установочных винтов, поворачивающих пластины вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Чем меньше этот угол, тем шире интерференционные полосы. Задние отражающие поверхности пластин посеребрены. Луч света SA , отразившись от передней и задней поверхностей пластины P_1 , разделяется на два параллельных луча AB и $C'D'$, между которыми возникает разность хода. Каждый из этих лучей в свою очередь раздваивается при отражении от пластины P_2 . Между средними лучами DE и $D'E'$ возникает разность хода

$$\Delta = 2dn (\cos \psi_2 - \cos \psi_1), \quad (34.1)$$

где d — толщина пластин, ψ_1 и ψ_2 — углы преломления в них, n — показатель преломления пластин относительно окружающего воздуха. Таким образом, на величину Δ пластины влияют противоположно. Потери фаз при отражении в формулу (34.1) не входят, так как они одинаковы для обоих интерферирующих лучей и компенсируют друг друга.

Если $\psi_1 = \psi_2$, то $\Delta = 0$. Если же угол между пластинами мал, то и разность хода невелика. Это позволяет наблюдать интерференцию низкого порядка, используя белый свет. Лучи DE и $D'E'$ будут интерферировать так же, как и соответствующие лучи в случае только одной, но тонкой плоскопараллельной пластинки.

Назначение двух толстых пластин состоит в том, чтобы далеко развести лучи AB и $C'D'$, что позволяет ставить на пути этих лучей

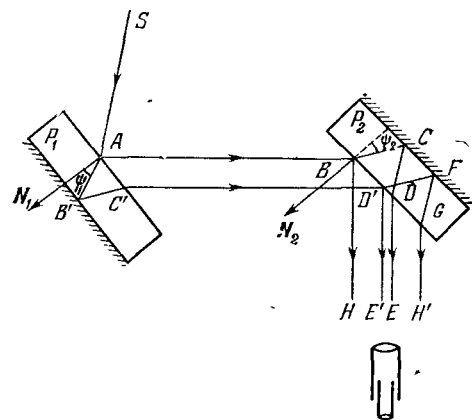


Рис. 137.

трубки с исследуемыми газами. Разность хода между средними и крайними лучами, а также между самими крайними лучами очень велика, и интерференцию в белом свете от этих лучей получить невозможно. Источником света обычно служит освещаемая вертикальная щель шириной около одного или нескольких миллиметров, прикрываемая матовым стеклом. Невооруженным глазом видны три изображения щели. Самое яркое (справа) дают лучи, дважды отразившиеся от задних посеребренных поверхностей пластин. Среднее, промежуточной яркости, образуется лучами DE и $D'E'$. Наименее яркое (слева) соответствует лучам, дважды отразившимся от передних поверхностей пластин. Если фиксировать глаз на сред-

нем изображении и вращением установочных винтов менять разность хода, то в белом свете можно получить цветные интерференционные полосы низкого порядка. Центральная ахроматическая полоса, т. е. полоса, которой соответствует разность хода $\Delta = 0$, получается белой. Наблюдая эту полосу, можно легко следить за смещением интерференционной картины.

Так как разность хода Δ зависит от направления падающих лучей, то в интерферометре Жамена получаются полосы равного наклона. Для их наблюдения удобно воспользоваться зрительной трубой небольшого увеличения, но большого поля зрения, установленной на бесконечность. Применение трубы не только увеличивает ширину полос, но и обладает еще тем преимуществом, что в трубу не попадают крайние лучи GH' и BH , создающие светлый фон и сильно уменьшающие контрастность интерференционных полос. В лекционных демонстрациях интерференционные полосы можно получать без дополнительных оптических приспособлений, направив лучи DE и $D'E'$ непосредственно на белый экран. Крайние лучи при этом должны быть экранированы.

3. Интерферометр Жамена предназначен для измерения небольших изменений показателей преломления. Поэтому его называют также *интерференционным рефрактометром*. Для уяснения принципа действия такого рефрактометра вообразим, что на пути одного из интерферирующих лучей AB или $C'D'$ (рис. 137) помещен плоскопараллельный слой какого-либо вещества толщины l с показателем преломления n_2 . Тогда разность хода между интерферирующими лучами изменится на величину $(n_2 - n_1)l$, где n_1 — показатель преломления окружающего воздуха. В результате интерференционная картина сместится на m полос, причем $m = (n_2 - n_1)l/\lambda$. Число m (вообще говоря, дробное) можно найти, наблюдая интерференционные полосы в белом свете до и после внесения исследуемого вещества. Опыт показывает, что смещение на $1/10$ полосы ($m = 1/10$) наблюдается вполне уверенно и без труда.

Разность показателей преломления можно вычислить по формуле $n_2 - n_1 = m\lambda/l$. Если толщина слоя вещества $l = 10$ см, а $\lambda = 500$ нм, то при $m = 1/10$ получаем $n_2 - n_1 = 5 \cdot 10^{-7} \sim 10^{-6}$. В специальных установках измерялись гораздо меньшие изменения показателя преломления. Интерферометр Жамена позволяет, таким образом, измерять ничтожные изменения показателя преломления, например, при изменении температуры газа или при добавлении к нему посторонних примесей. Измерение самих абсолютных значений показателя преломления этим прибором затруднительно. Обычно его используют для измерения разности показателей преломления исследуемого и хорошо изученного газа, например воздуха.

При практических измерениях на пути лучей AB и $C'D'$ ставятся по возможности одинаковые трубки. Сначала наблюдаются интер-

ференционные полосы, когда обе трубки наполнены воздухом. Затем измеряется смещение полос интерференции, когда одна из трубок наполняется исследуемым газом. Для компенсации значительной разности хода между интерферирующими лучами служит компенсатор. Он состоит из двух совершенно одинаковых стеклянных пластинок, насаженных на общую ось, причем угол наклона между пластинками можно плавно менять. Одна из пластинок ставится на пути одного, вторая — на пути другого лучей. Вращая компенсатор при неизменном угле наклона между пластинками, можно привести в поле зрения центральную ахроматическую полосу, а затем по углу поворота определить число полос, прошедших через поле зрения.

4. Не так просто разобраться в вопросе о форме интерференционных полос, наблюдаемых в интерферометре Жамена. Для упрощения исследования этого вопроса введем несущественное предположение, что $n = 1$. Такому предположению соответствует замена каждой пластины парой бесконечно тонких параллельных отражающих плоскостей (из которых одна посеребрена). Тогда вместо (34.1) получится более простое выражение:

$$\Delta = 2d (\cos \psi_2 - \cos \psi_1).$$

Перейдем к векторной форме записи, обозначив через N_1 и N_2 единичные нормали к отражающим плоскостям, как это показано на рис. 137. Обозначим через s_1 , s'_1 , s единичные векторы лучей SA , AB и BH соответственно (те же векторы определяют направления и всех параллельных им лучей). Тогда

$$\cos \psi_1 = (N_1 s'_1) = - (N_1 s'_1), \quad \cos \psi_2 = (N_2 s).$$

По закону отражения $s'_1 = s - 2 (N_2 s) N_2$, а потому

$$\cos \psi_1 = - (N_1 s) + 2 (N_2 s) (N_1 N_2).$$

Следовательно,

$$\Delta = 2d (N_1 + N_2) s - 4d (N_2 s) (N_1 N_2).$$

Введем новые векторы

$$N = \frac{1}{2} (N_1 + N_2), \quad v = \frac{1}{2} (N_2 - N_1).$$

Из них первый направлен по биссектрисе угла между нормальями N_1 и N_2 , а второй перпендикулярен к этой биссектрисе. Очевидно,

$$N_1 = N - v, \quad N_2 = N + v.$$

После подстановки этих выражений в формулу для Δ получим

$$\Delta = -4d (1 - v^2) (vs) + 4dv^2. \quad (34.2)$$

При работе с прибором угол между пластинами, а следовательно, и длина вектора \mathbf{v} всегда малы. Поэтому квадратичными членами, содержащими v^2 , в формуле (34.2) обычно можно пренебречь.

5. Для светлых полос $\Delta = m\lambda$, для темных $\Delta = (m + 1/2)\lambda$, где m — целое число (порядок интерференции). Если для наблюдения используется труба, то она сводит параллельные лучи в фокальной плоскости объектива, где и получается первичная интерференционная картина. Поле зрения трубы ограничено, так что используется лишь небольшой участок фокальной плоскости. При повороте трубы вокруг оптического центра объектива поворачивается и фокальная плоскость вместе с выделенным участком. Если последний мал, то без заметной ошибки можно принять все такие участки за элементы неподвижной сферы, центр которой совпадает с оптическим центром объектива. Назовем для краткости такую вспомогательную сферу *фокальной сферой объектива*. (Если объектив не является тонкой линзой, то все это можно повторить, заменив только оптический центр второй узловой точкой объектива.) Можно сказать, что первичная интерференционная картина как бы создается на неподвижной фокальной сфере, а наблюдатель рассматривает эту картину через окуляр трубы. Поворачивая трубу, он видит на фокальной сфере различные участки интерференционной картины. Разумеется, вид картины совершенно не зависит от того, вокруг какой точки вращалась труба, он определяется только *направлением* последней.

Таким образом, вопрос о форме видимых полос интерференции сводится к вопросу о форме их на вспомогательной фокальной сфере. Практически, однако, вращение трубы всегда производится вокруг вертикальной оси. Поэтому наблюдению доступен только узкий экваториальный пояс на фокальной сфере. Его приближенно можно считать поверхностью цилиндра с вертикальной осью, проходящей через оптический центр объектива. В дальнейшем ограничимся рассмотрением интерференционных полос только на таком «цилиндрическом фокальном пояске».

Фиксировав положение пластин интерферометра, отложим векторы \mathbf{N} и \mathbf{v} , а также единичный вектор луча \mathbf{s} из общего начала O , помещенного в оптическом центре объектива. Направления этих векторов будут играть роль координатных осей, перпендикулярную к ним прямую примем за ось Z . Различные единичные векторы лучей \mathbf{s} будем откладывать из того же начала O . Как видно из (34.2), на поверхностях равных фаз $(\mathbf{v}\mathbf{s}) = \text{const}$, т. е. эти поверхности представляют собой параллельные плоскости, перпендикулярные к вектору \mathbf{v} . Среди этих плоскостей находятся и равноотстоящие плоскости, на которых разность хода Δ содержит целое или полуцелое число длин волн. Они пересекают фокальную сферу вдоль некоторых кривых, которые и представляют собой интерференционные полосы, наблюдаемые в трубу. Ввиду малости поля зрения,

при каждом положении трубы наблюдается лишь незначительный участок фокальной сферы, на котором интерференционные полосы практически неотличимы от прямолинейных.

В интерферометре Жамена первая пластина обычно неподвижна и установлена вертикально. Вторую пластину можно немного поворачивать вокруг вертикальной и горизонтальной осей, параллельных отражающим плоскостям. Если пластины строго параллельны друг другу, то $\mathbf{v} = 0$ и $\Delta = 0$. Следовательно, никаких интерференционных полос нет, все поле зрения освещено равномерно. В этом положении нормали N_1 и N_2 , а следовательно, и вектор N лежат в горизонтальной плоскости.

Повернем теперь вторую пластину на малый угол вокруг вертикальной оси. Тогда вектор \mathbf{v} расположится в той же горизонтальной плоскости (рис. 138, а). Перпендикулярные к нему плоскости

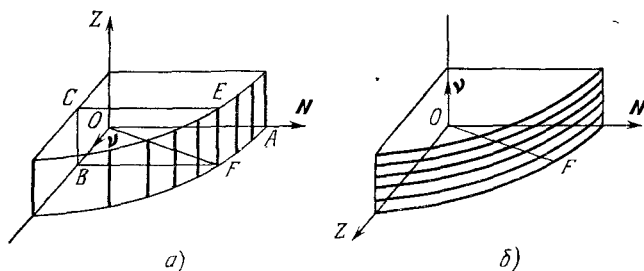


Рис. 138.

равных фаз вертикальны. Одна из таких плоскостей $BCEF$ изображена на рис. 138, а. Она пересекает экваториальный цилиндрический пояс вдоль вертикального отрезка EF . Следовательно, интерференционные полосы, лежащие на этом пояске, будут вертикальны. На схематическом рис. 138, а они представлены жирными отрезками. Ширина интерференционных полос минимальна при наблюдении вдоль N и максимальна при наблюдении вдоль \mathbf{v} . Однако фактически ось трубы OF бывает направлена под углом $\approx 45^\circ$ к нормали N . Тогда вертикальные интерференционные полосы могут наблюдаться только в монохроматическом (квазимонохроматическом) свете, так как им соответствуют высокие порядки интерференции. Действительно, если наблюдение ведется вдоль N , то $(\mathbf{sv}) = 0$, и формула (34.2) дает $\Delta = 4d\mathbf{v}^2$. Ввиду малости \mathbf{v} порядок интерференции получается низким. Нулевая полоса практически проходит через точку A .

Когда труба направлена вдоль N или близко к этому направлению, вертикальные интерференционные полосы можно увидеть и в белом свете. Но при удалении от этого направления скалярное произведение (\mathbf{sv}) , а с ним и порядок интерференции возрастают.

При повороте на угол $\approx 45^\circ$ порядок интерференции становится столь высоким, что вертикальные интерференционные полосы в белом свете наблюдаться уже не могут. Исключение было бы только в случае очень малых ν , когда порядок интерференции при любых положениях трубы низкий. Но тогда интерференционная полоса была бы столь широка, что не уместилась бы в поле зрения трубы. Поэтому этот случай не представляет никакого интереса.

Совсем иное положение возникнет, если вторую пластину из исходного положения повернуть вокруг горизонтальной оси. Тогда вектор ν встанет вертикально (рис. 138, б), а перпендикулярные к нему плоскости равных фаз сделаются горизонтальными. Интерференционные полосы определяются, если пересечь такими плоскостями поверхность экваториального цилиндрического пояса. На рис. 138, б они изображены жирными дугами окружностей, плоскости которых горизонтальны. При этом все они будут низкого порядка, а потому могут наблюдаться в белом свете, так как наблюдение ведется практически перпендикулярно к ν , когда $(\nu s) \approx 0$. В поле зрения трубы будут видны практически прямолинейные горизонтальные полосы. Легко сообразить, что при наклоне вектора ν интерференционные полосы сделаются также наклонными к горизонту. Но в белом свете могут наблюдаться только интерференционные полосы малого наклона. Для получения полос с большим наклоном надо пользоваться монохроматическим (квазимонохроматическим) светом.

Все приведенные рассуждения можно повторить по той же схеме и не вводя предположения, что $n = 1$. Для избежания громоздкости вычислений надо только всюду ограничиться членами, линейными по ν , отбрасывая все члены более высоких степеней. При этом окончательные результаты не претерпят никаких существенных изменений.

6. Интерферометр Жамена обладает рядом недостатков, делающих его непригодным в некоторых особенно тонких оптических исследованиях. Изготовить пластины толще 5 см из вполне однородного стекла с точно параллельными плоскостями практически невозможно. Поэтому и интерферирующие лучи AB и $C'D'$ невозможно развести на расстояние больше ~ 4 см. Но главный недостаток интерферометра Жамена состоит в том, что толстые пластины при освещении медленно прогреваются и медленно приходят в состояние теплового равновесия. Это приводит к тому, что интерференционные полосы часами медленно ползут в поле зрения трубы. Крайне затруднена работа в ультрафиолетовой области, требующая уникальных пластин из кварца или флуорита. Указанные недостатки устранены в интерферометре Д. С. Рождественского (1876—1940).

Интерферометр Рождественского принципиально не отличается от интерферометра Жамена. Каждая пластина в нем заменена

комбинацией из двух параллельно установленных тонких пластинок M_1 , P_1 и M_2 , P_2 (рис. 139). Пластинки M_1 и M_2 посеребрены и выполняют роль зеркал. Пластинки P_1 и P_2 , также посеребренные, полупрозрачны, они пропускают половину падающего света, а остальную половину отражают. Комбинация параллельных пластинок M_2 , P_2 может поворачиваться на малый угол относительно другой комбинации также параллельных пластинок M_1 , P_1 . Ход лучей в интерферометре показан на схематическом рис. 139. Прибор действует так же, как и интерферометр Жамена. В нем наблюдаются интерференционные полосы равного наклона.

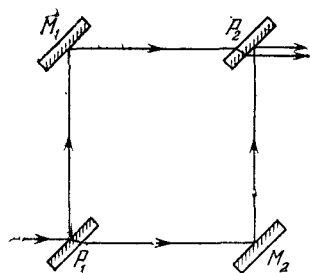


Рис. 139.

Аналогично устроен построенный несколько раньше интерферометр Маха — Цендера. Отличие от интерферометра Рождественского состоит в том, что параллельно устанавливаются между собой зеркала M_1 и M_2 , а также полупрозрачные пластины P_1 и P_2 . Одна пара пластин может поворачиваться на малый угол относительно другой пары.

§ 35. Интерферометр Майкельсона

С помощью *интерферометра Майкельсона* (1852—1931) впервые было проведено систематическое изучение тонкой структуры спектральных линий и выполнено первое прямое сравнение эталонного метра с длиной световой волны. Знаменитый опыт Майкельсона — Морли, целью которого было обнаружение движения Земли относительно эфира (см. § 102), был выполнен также с помощью интерферометра Майкельсона. В настоящее время интерферометр Майкельсона устарел. Однако историческое значение указанных выше исследований, в особенности последнего, слишком велико. Поэтому необходимо хотя бы кратко остановиться на описании устройства и работы интерферометра Майкельсона.

Схема интерферометра приведена на рис. 140. Свет от протяженного источника S попадает на плоскопараллельную разделительную пластинку P_1 , покрытую полупрозрачным тонким слоем серебра или алюминия. Эта пластинка частично пропускает, частично отражает свет, разделяя падающий пучок на два взаимно перпендикулярных пучка. Первый пучок, пройдя через пластинку P_1 , отражается обратно зеркалом M_1 , а затем частично отражается от пластинки P_1 в направлении AO . Второй пучок, отразившись от покрытой металлом поверхности пластинки P_1 , направляется к зеркалу M_2 , отражается от него, снова проходит через пластинку P_1 и далее идет в направлении AO , как и первый пучок.