

Все эти случаи можно отличить (в опытах Брауна и Твисса) от случая, когда группы волн никогда не перекрываются, для которого всегда справедливо: $100 + 100 = 200$ фотонов. Теперь нам ясно, что для выполнения эксперимента необходимо иметь интенсивный источник света (чтобы увеличить возможность перекрытия волновых групп двух фотонов) и фотоны с узкой полосой частот [поскольку длина волновой группы равна скорости, умноженной на среднее время жизни (т. е. $c/\Delta\nu$), и более длинным волновым группам легче перекрыться друг с другом].

9.4. Сколь велик может быть «точечный» источник света?

На рис. 9.1 было показано, как получить два когерентных источника света (т. е. два источника, у которых разность фаз постоянна), освещая «точечным» источником две щели в непрозрачном экране.

Если источник света настолько велик, что первая щель освещается одной группой атомов, а вторая — другой группой, то источники некогерентны, т. е. их фазы некоррелированы (для измерений в течение времени, большего $(\Delta\nu)^{-1}$). Оба эти случая показаны на рис. 9.8.

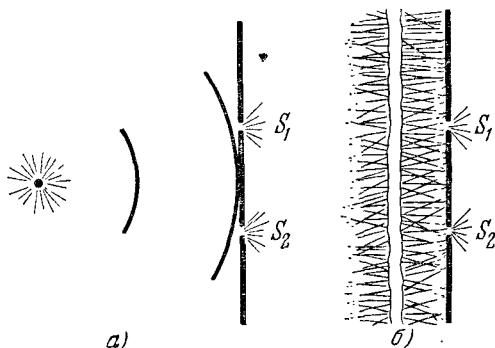


Рис. 9.8.

а) Источники S_1 и S_2 возбуждаются общим точечным источником, и их относительная фаза не меняется — они когерентны. б) Источники S_1 и S_2 возбуждаются рядом независимых излучающих атомов. Для интервалов времени, больших $(\Delta\nu)^{-1}$, эти источники некогерентны.

Классический точечный источник. Ближе всего понятию «точечный источник» отвечает отдельный атом. В соответствии с классическими представлениями он испускает электромагнитные волны во

всех направлениях и воздействует на края щелей (рис. 9.8, а) с одинаковой фазой. (Квантовая теория дает такой же результат.) Реальный источник света состоит из огромного числа излучающих атомов. Если все они находятся в одной точке, то мы имеем точечный источник. (Это более реальная модель классического точечного источника, чем отдельный атом.) Однако в любом реальном источнике атомы занимают объем конечных размеров. Нас интересует, насколько большим может быть источник света, оставаясь при этом «точечным» (имеется в виду, что токи, возникающие в обеих щелях в результате действия точечного источника, сохраняют постоянную разность фаз)?

Простой протяженный источник. Рассмотрим очень простой не точечный источник. Он состоит из трех независимых точечных источников S_a , S_b и S_c , у которых основная частота, ширина полосы

частот и средняя интенсивность одинаковы. Расположение источников показано на рис. 9.9. Предположим, что вначале включен только источник S_a . В этом случае его воздействия на щели 1 и 2 имеют одинаковую фазовую постоянную (положим, что она равна нулю). Поэтому два источника, образованные щелями, всегда когерентны. Пусть теперь включены два источника, S_a и S_c . Источник S_c имеет ту же доминирующую частоту и ширину полосы, но он не коррелирован по фазе с источником S_a . Поэтому разность фаз источников S_a и S_c не остается постоянной в течение времени, большего $(\Delta\nu)^{-1}$. Однако разность фаз излучения от щелей 1 и 2 будет равна нулю все время, так как источник S_c воздействует на обе щели с нулевой

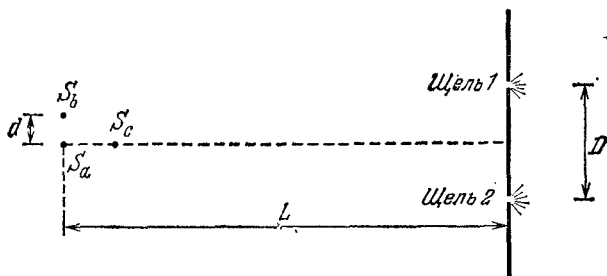


Рис. 9.9. Когерентность.

Щели 1 и 2 возбуждаются тремя независимыми источниками S_a , S_b и S_c . Нужно ли объединить эти источники в один, чтобы щели 1 и 2 были когерентными?

разностью фаз, т. е. так же, как источник S_a . Токи в щелях могут рассматриваться как суперпозиция токов, вызванных двумя источниками, и если каждый источник дает нулевую разность фаз между излучением щелей, то то же даст и суперпозиция. Таким образом, мы видим, что точечный источник может иметь протяженность вдоль линии, соединяющей S_a и S_c , и это не нарушит когерентности щелей 1 и 2.

Теперь рассмотрим случай, когда включены источники S_a и S_b , а источник S_c выключен. Источники S_a и S_b — это независимые источники, имеющие одинаковую основную частоту, ширину полосы и среднюю интенсивность. В течение временного интервала, меньшего $(\Delta\nu)^{-1}$, амплитуда и фазовая постоянная каждого источника остаются неизменными. Предположим, что в данный момент (под «моментом» подразумевается временной интервал, меньший времени когерентности $(\Delta\nu)^{-1}$, но достаточно большой, чтобы вместить по крайней мере цикл быстрых колебаний и чтобы мы могли говорить о вполне определенных амплитуде и фазе) амплитуда источника S_b мала по сравнению с амплитудой источника S_a . В этом случае с хорошей степенью точности можно считать, что щели освещаются только источником S_a и исходящее из них излучение имеет поэтому нулевую разность фаз. Теперь подождем некоторое время, которое велико по сравнению с временем когерентности источников S_a и S_b . Предположим, что амплитуды коле-

баний S_a и S_b теперь практически равны. В этом случае экран с двумя щелями будет освещаться интерференционной картиной от двух источников (см. рис. 9.5, 9.6 и 9.7). Местоположение максимумов и минимумов в этой картине зависит от разности фаз источников S_a и S_b . Нас интересует, обеспечивает ли вынуждающая сила, действующая в этом случае на щели 1 и 2, нулевую разность фаз. Мы знаем, что амплитуда интерференционной картины меняет знак при переходе от одного интерференционного максимума к другому. [В соответствии с уравнением (13) п. 9.2 амплитуда $A(r, \theta)$ пропорциональна $\cos [1/2(\varphi_1 - \varphi_2) + (\pi d \sin \theta)/\lambda]$. Отсюда следует, что амплитуда изменяет знак, когда $d \sin \theta$ возрастает на λ .] Мы видим, что разность фаз для обеих щелей будет равна нулю большую часть времени, если расстояние между ними много меньше, чем расстояние x_0 между двумя соседними интерференционными максимумами в интерференционной картине от двух источников. (Даже когда две щели расположены близко, может случиться, что нуль интерференционной картины, освещающей их, попадает между щелей. В этом случае разность фаз равна 180° . Однако при большем сближении щелей это будет иметь место все меньшую и меньшую часть времени.) Итак, необходимо, чтобы

$$D \ll x_0, \quad (33)$$

где x_0 — расстояние между соседними максимумами в интерференционной картине, определяемое из равенства (22) п. 9.2:

$$x_0 = L \frac{\lambda}{d}. \quad (34)$$

Условие когерентности. «Протяженный источник», состоящий из точечных источников S_a , S_b и S_c , ведет себя, как точечный, при условии, что выполняется условие когерентности

$$D \ll \frac{L\lambda}{d}, \quad (35)$$

т. е.

$$d \ll \frac{L\lambda}{D}, \quad (36)$$

или

$$L \gg \frac{dD}{\lambda}. \quad (37)$$

В зависимости от того, какие параметры экспериментально доступны, применяется тот или иной критерий (35) — (37). [Домашний опыт 9.20 дает возможность легко проверить условие (37). В этом опыте величина L является переменной.] Условие когерентности легче всего запомнить в виде следующей формулы:

$$\boxed{dD \ll L\lambda}. \quad (38)$$

Таким образом, произведение двух поперечных длин d и D должно быть мало по сравнению с произведением двух продольных длин L и λ (см. рис. 9.9).

Пусть источник состоит из большого числа точечных источников, расположенных между S_a и S_b , так что его ширина равна d . Условие (38), полученное для двух крайних точек a и b , будет применимо и к источнику в целом. (Точечные источники, расстояния между которыми меньше d , когерентны, если когерентны источники, находящиеся на расстоянии d .)

Аналогично, если мы имеем экран со многими щелями, то условие когерентности [уравнение (38)] применимо ко всей группе щелей, если D — расстояние между крайними щелями.

9.5. Угловая ширина пучка бегущих волн

Пучок бегущих волн, распространяющийся в данном направлении, обычно имеет вполне определенную конечную ширину. Пучок видимого света от прожектора и пучок микроволн от радара можно создать, поместив небольшой источник электромагнитного излучения в фокусе параболического рефлектора. Этот источник возбуждает электроны на металлической поверхности рефлектора, и они колеблются с такими разностями фаз, что отраженное излучение от всех точек поверхности рефлектора конструктивно интерферирует вдоль направления луча. Другим способом получения светового пучка является отражение плоским зеркалом света от небольшого или удаленного источника (например, солнца). Вместо зеркала можно использовать отверстие в непрозрачном экране. Если источник находится достаточно далеко или достаточно мал, то излучение, падающее на зеркало (или отверстие), можно считать плоской волной, т. е. волной, в которой все излучение распространяется точно в одном направлении. Зеркало отражает часть плоской волны. Аналогично, если достаточно малый источник находится в фокусе зеркала, представляющего собой идеальный параболоид, то пучок (в некотором приближении), подобно «сегменту плоской волны», состоит из излучения, распространяющегося в одном направлении. Все вышесказанное справедливо и для звуковых волн, и для волн в воде.

Ограничение углового разброса пучка из-за дифракции. Теперь возникает интересный и важный вопрос: можно ли создать пучок волн, который был бы ограниченной в сечении частью плоской волны? В таком пучке волна распространялась бы строго в одном направлении, и мы имели бы совершенно параллельный, ограниченный в сечении пучок, уходящий в бесконечность. Такой пучок создать *нельзя*. Сколь бы малым ни был источник в фокусе идеальной параболы, пучок не будет совершенно параллельным. Возьмем за основное направление ось z . Пусть «пространственная» ширина пучка (для данного z , например, сразу после рефлектора) равна D . В этом случае возникнет угловой разброс в направлениях распространения, и величина этого разброса, определяемая по половине максимальной интенсивности, будет порядка λ/D . (Это будет доказано ниже.)