

скопа, чтобы полностью использовать разрешающую способность объектива телескопа?

О т в е т. $n \sin \alpha \geq D/(2f)$, $N \geq DL/(fd)$, где L — расстояние ясного зрения, d — диаметр зрачка глаза.

14. Современные фотопластики способны разрешать до $z = 10^4$ линий на сантиметр. Какую светосилу (т. е. отношение квадратов диаметра D и фокусного расстояния f) должен иметь объектив фотоаппарата, чтобы полностью использовать разрешающую способность пленки?

О т в е т. $(D/f)^2 \geq z^2 \lambda^2 \approx 0,25$.

§ 59. Фазовый контраст

1. В зависимости от вида изучаемых объектов при работе микроскопа следует различать два предельных случая. Одни объекты, называемые *абсорбционными*, в различных местах обладают различной прозрачностью. Такие объекты в основном влияют на *амплитуду* проходящего света. Другие объекты, называемые *рефракционными*, практически не поглощают света. Имея в различных местах различные толщины и показатели преломления, они влияют не на интенсивность, а на *фазу* проходящего света. Типичными примерами абсорбционного и рефракционного объектов могут служить амплитудная и фазовая дифракционные решетки.

Абсорбционные объекты дают *контрастные изображения* с хорошо выраженными границами между темными и светлыми частями. На них можно обнаружить все детали, которые способен разрешить микроскоп при заданной разрешающей способности. Напротив, изображения рефракционных объектов почти лишены контраста. В таких изображениях трудно, а часто и практически невозможно разрешить детали изучаемого объекта, хотя бы разрешающей способности микроскопа и было достаточно для этой цели. Причина такого различия между абсорбционными и рефракционными структурами состоит в том, что объектив микроскопа воспроизводит в плоскости изображения, а следовательно и на сетчатке глаза, то же распределение интенсивности светового поля, которое существует в плоскости объекта, а светочувствительные нервные окончания сетчатки реагируют именно на *интенсивность* световой волны, а не на ее фазу.

С рефракционными объектами постоянно приходится иметь дело в биологии при изучении хотя бы микроорганизмов. Биологические объекты в подавляющем большинстве случаев практически совершенно прозрачны в видимой области спектра. Отсутствие контраста в изображении затрудняет изучение таких объектов. Поэтому проблема контрастности изображения стоит в биологии особенно остро. Один из методов ее решения состоит в превращении рефракционных объектов в абсорбционные путем дифференциального окрашивания объекта. Однако такой метод не всегда возможен. Кроме того, он убивает живые организмы или по крайней мере нарушает их нормальную жизнедеятельность. Единственный метод изучения биологических объектов в естественных условиях состоит в том, чтобы воздействовать не на самый объект, а на *его изображение*. Это достигается в *методе фазового контраста*, предложенном Цернике (1888—1966) в 1934 г.

2. Идею метода фазового контраста проще всего выяснить на примере периодической структуры — одномерной дифракционной решетки. Различие между амплитудной и фазовой решетками с интересующей нас точки зрения по существу уже было выяснено в § 53. Остановимся на этом вопросе более подробно.

Отвлекаясь от поляризации, будем рассматривать свет как скалярное волновое поле и представлять световые колебания векторами на векторной диаграмме. Пусть свет падает нормально на поверхность решетки. Допустим сначала, что решетка амплитудная и состоит из чередующихся участков различной прозрачности, причем на участках *I* прозрачность больше, а на участках *II* — меньше. Для простоты (это несущественно для выяснения существа вопроса) предположим, что участки *I* и *II* имеют одинаковую ширину. Колебание на выходе участка *I* изобразится более длинной стрелкой *a*, чем колебание на выходе участка *II*, представляемое стрелкой *b* (рис. 222). Так как амплитудная решетка не вносит

разности фаз между волнами, прошедшими через различные участки ее, то обе стрелки a и b будут направлены одинаково.

Допустим теперь, что решетка фазовая и геометрически подобна амплитудной, т. е. состоит из чередующихся участков той же ширины, влияющих на фазу, но не на амплитуду волны. Колебания на выходе этих участков изобразятся стрелками A и B одинаковой длины, но различно направленными (рис. 222, положение a),

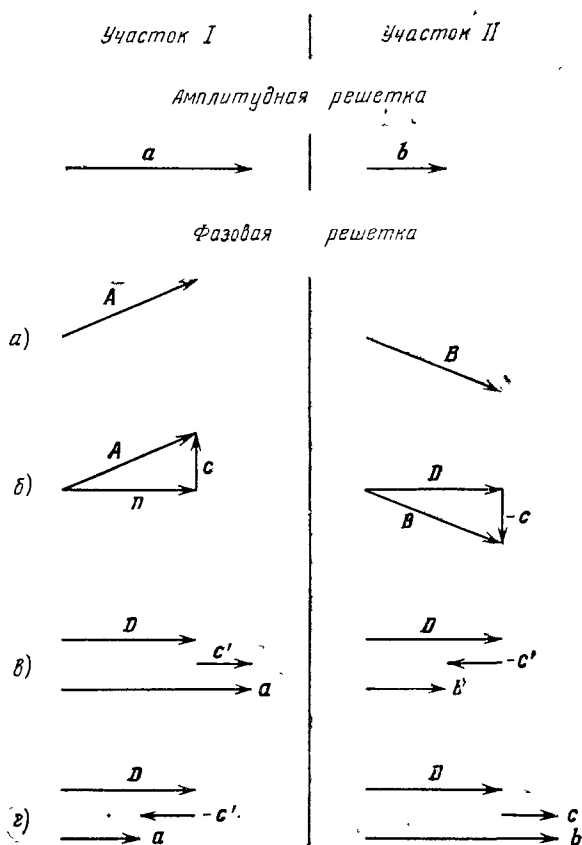


Рис. 222.

Поскольку существенна лишь относительная разность фаз между обоими колебаниями, стрелки A и B можно повернуть на один и тот же угол, ничего не меняя в физических условиях задачи. Поэтому, не нарушая общности, можно предположить, что биссектриса угла между векторами A и B горизонтальна, т. е. параллельна поверхности решетки. Разложим каждый из векторов A и B на горизонтальную и вертикальную составляющие: $A = D + c$, $B = D - c$ (рис. 222, положение б). Допустим теперь, что оба вектора c и $-c$ повернуты на 90° в одном и том же направлении в положения c' и $-c'$ (рис. 222, положение в). Тогда на выходе участков I и II колебания представляются векторами $a = D + c'$ и $b = D - c'$, параллельными поверхности решетки. Поле на выходе фазовой

решетки будет иметь такой же вид, что и на выходе амплитудной решетки. Поворот на 90° означает изменение фаз соответствующих колебаний на такой же угол. Таким образом, изменением фазы колебания на 90° можно превратить фазовую решетку в амплитудную. В этом и состоит идея метода фазового контраста.

При рассмотренном повороте по часовой стрелке вектор a получается длиннее вектора b . Это значит, что светлым местам в изображении амплитудной решетки будут соответствовать светлые же места в изображении фазовой решетки, а темным — темные (*позитивный фазовый контраст*). Если же векторы c и $-c$ повернуть на 90° в противоположном направлении (рис. 222, положение z), то соотношение между длинами векторов a и b , а с ним и соответствие между светлыми и темными частями заменятся на противоположные (*негативный фазовый контраст*).

3. Чтобы повернуть векторы c и $-c$, сохраняя неизменным направление вектора D , надо прежде всего пространственно разделить волновые поля, представляемые этими векторами. Полное колебание на выходе решетки можно разложить на два колебания. Одно колебание имеет постоянную амплитуду на протяжении всей решетки и изображается постоянным вектором D . Оно дает в фокальной плоскости объектива центральный максимум нулевого порядка и не влияет на все остальные максимумы. Другое колебание представляется периодической функцией, которая равна $+c$ на одних участках решетки и $-c$ на соседних участках. Так как среднее по периоду решетки значение такой функции равно нулю, то такое колебание будет возбуждать только боковые максимумы, не оказывая никакого влияния на центральный максимум нулевого порядка. Таким образом, в фокальной плоскости объектива оба колебания окажутся пространственно разделенными. Одно концентрируется в центральном максимуме, другое распределяется по всем остальным — боковым — максимумам. Поставив на пути либо центрального максимума, либо всех боковых максимумов прозрачную плоскопараллельную пластинку надлежащей толщины, можно внести необходимую разность фаз в 90° и тем самым осуществить фазовый контраст. Такая пластинка называется *фазовой*.

4. До внесения фазовой пластинки энергия на участке I в условных единицах представляется выражением $A^2 = D^2 + c^2$. Такова же энергия на участке II . Полная энергия на обоих участках равна $2(D^2 + c^2)$. После поворота векторов c и $-c$ на 90° энергии на участках I и II будут равны соответственно $(D + c)^2$ и $(D - c)^2$, а их сумма $2(D^2 + c^2)$. Таким образом, энергия не изменится, а лишь перераспределяется между участками I и II . Этим перераспределением и объясняется просветление участков I и потемнение участков II .

§ 60. Измерение угловых диаметров звезд

1. Пусть перед объективом телескопа помещен экран с двумя круглыми отверстиями, расстояние между центрами которых равно D (рис. 223). Направив телескоп на звезду, закроем сначала правое отверстие. В результате дифракции на открытом левом отверстии в фокальной плоскости объектива получится система дифракционных колец. Их положение и размеры будут зависеть только от диаметра отверстия, но не от его положений в плоскости экрана. Поэтому, если закрыть левое отверстие и открыть правое, то дифракционная картина в фокальной плоскости объектива, видимая глазом, не изменится. Если затем открыть оба отверстия, то одна система дифракционных колец точно совместится с другой. При этом не получится, однако, простого усиления яркости дифракционных колец. Дифракционные кольца будут пересечены параллельными интерференционными полосами, перпендикулярными к линии, соединяющей центры отверстий O_1 и O_2 (рис. 224). Как и в опыте Юнга, эти полосы возникают из-за интерференции дифракционных пучков света, исходящих из первого и второго отверстий. Направления на соседние интерференционные максимумы (или минимумы) отличаются на угол $\theta = \lambda/D$. Это и есть угловое расстояние между соседними интерференционными полосами, если смотреть на фокальную плоскость из центра объектива,