378.147:535.4

ОПЫТЫ ПО ФРЕНЕЛЕВОЙ ДИФРАКЦИИ ОТ УЗКОГО ПРОЗРАЧНОГО КОЛЬЦА В НЕПРОЗРАЧНОМ ЭКРАНЕ

Светлое дифракционное пятно в средней части геометрической тени, типичное (при когерентном освещении) для картины френелевой дифракции от шара или диска, может быть получено и в том случае, когда в качестве объекта дифракции используется узкий кольцевой вырез (прозрачное кольцо) в непрозрачном экране.

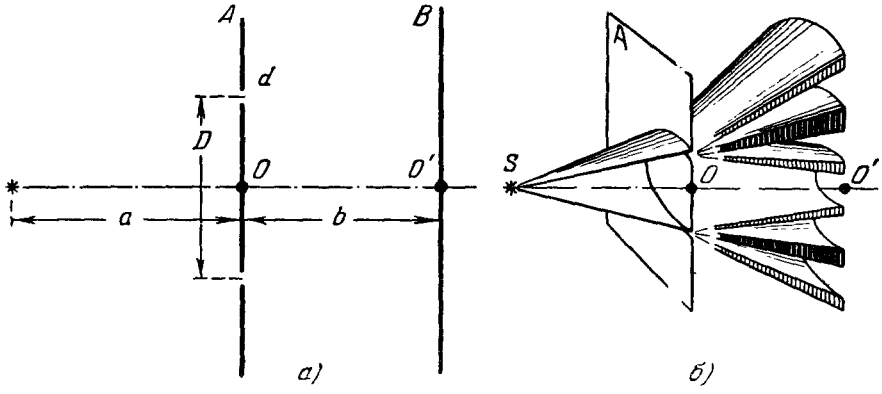


Рис. 1.

Если освещение не является когерентным в пределах всего прозрачного кольца (а при значительном диаметре последнего осуществить когерентное освещение практически не представляется возможным), то, как и при дифракции от шара или диска, тонкая кольцевая интерференционная структура картины исчезает. Тем не менее теперь (в отличие от случая шара или диска) на экране наблюдения B (рис. 1, *а*) возникает картина, имеющая отчетливо выраженную кольцевую структуру. Последняя обусловлена интерференционным эффектом на отдельных малых азимутальных элементах прозрачного кольца (в пределах каждого из которых освещение остается когерентным) в сочетании с эффектом суммирования интенсивностей пучков, дифрагирующих от различных элементарных участков.

Эта картина представляет собой систему широких вторичных дифракционных колец, прилегающих извне и изнутри к главному кольцу, причем периодичность дифракционных колец определяется не диаметром прозрачного кольца D, а его шириной d.

При некоторых определенных положениях экрана B в центральной части картины перекрываются пучки (дифрагирующие от различных элементов прозрачного кольца), которым соответствует вторичный максимум интенсивности некоторого порядка k. В этом случае в результате суммирования интенсивностей перекрывающихся пучков возникает светлое центральное дифракционное пятно k-го порядка. При достаточно малой ширине прозрачного кольца (0,004—0,005 *см*) оказывается возможным, используя сравнительно несильный источник света, получить дифракционную картину с отчетливо различимым центральным пятном такого рода от кольца с диаметром 4—5 *см* на экране, удаленном от него всего лишь на несколько дециметров!

Если вместо малого источника света используется протяженный светящийся объект, то при определенных положениях экрана наблюдения в средней части картины возникает дифракционное изображение источника, поскольку каждый малый светящийся участок последнего отображается на экране в виде соответствующего ему центрального дифракционного пятна.

Способность кольца создавать дифракционное изображение дает основание использовать для его характеристики понятие фокусного расстояния. Из сказанного выше следует, однако, что кольцо характеризуется не единственным значением F, а целым набором фокусных расстояний F_k. Расчеты приводят к формуле

$$F_k \approx \frac{1}{2k+1}\frac{Dd}{\lambda} \qquad (k=1, 2, 3, \ldots). \tag{1}$$

На основании формулы (1) можно сделать вывод о двух отличительных особенностях рассматриваемого случая френелевой дифракции. Во-первых, кольцо обладает значительной хроматической аберрацией (знак которой противоположен знаку хроматической аберрации для простой собирающей линзы).

Во-вторых, при достаточно малом значении d фокусное расстояние F_k сравнительно невелико и с помощью такого кольца практически можно получить дифракционное изображение светящегося объекта при расстояниях между приборами в десятки раз меньших, чем в случае шара (или диска) одинакового с кольцом диаметра.

Демонстрационные возможности метода могут быть заметно увеличены, если использовать объект в виде двух концентрических прозрачных колец одинаковой ширины. В этом случае вид дифракционной картины изменяется в результате интерференции пучков, дифрагирующих от различных колец. Если ширина d каждого кольца составляет 0,004—0,005 *см*, а расстояние c между их средними линиями, отсчитанное вдоль радиуса, лишь в несколько раз превосходит эту величину, то практически полное перекрывание пучков, дифрагирующих от соответственных азимутальных элементов колец, происходит уже при малых расстояниях от двойного кольца до экрана наблюдения. При когерентности перекрывающихся пучков интерференционный эффект приводит к тому, что в области главного дифракционного кольца, так же как и в области вторичных колец, возникает система более узких интерференционных колец. По существу опыт в такой его постановке представляет собой видоизменение классического опыта Юнга. Однако в силу осевой симметрии расположение характеризуется рядом особенностей, благоприятных для демонстрации явления.

Для того чтобы интерференционные кольца оказались одинаково контрастными в различных своих местах, теперь в качестве источника света следует использовать освещенное отверстие круглой формы. Размеры последнего ограничены условием когерентности. Однако при малых значениях c эти ограничения незначительны.

При освещении прибора белым светом картина, возникающая на экране наблюдения, принимает следующий вид: вдоль средней линии главного дифракционного кольца располагается узкое неокрашенное интерференционное кольцо нулевого порядка; изнутри и извне к нему прилегают цветные интерференционные кольца последующих порядков. Число таких колец, укладывающихся в пределах главного дифракционного кольца, зависит от соотношения c/d. Эта часть картины представляет наибольший интерес, поскольку в области главного кольца распределяется подавляющая часть проходящего через прибор светового потока, а возникающие здесь интерференционные кольца имеют низкий порядок интерференции и доступны наблюдению в белом свете.

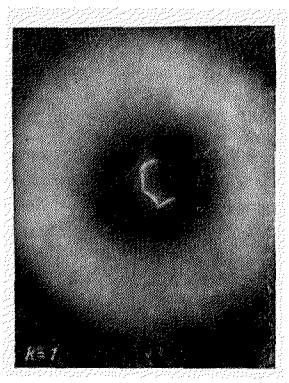
В силу осевой симметрии расположения нетрудно осуществить радиальное «сжатие» картины и добиться того, чтобы главное кольцо занимало меньшую площадь в средней части картины, что приводит к выигрышу в освещенности. С этой целью вблизи объекта (двойного кольца) следует поместить простую собирательную линзу так, чтобы главная оптическая ось ее совпадала с осью прибора. Наблюдаемое при этом изменение положения интерференционных колец можно рассматривать как следствие возникновения дополнительной разности хода интерферирующих лучей, обусловленное изменением толщины линзы как при переходе от одного прозрачного кольца к другому, так и в пределах ширины каждого из них.

Теперь вид картины на экране наблюдения в существенной степени зависит от его положения. Если, например, последний удален настолько, что внутренняя граница главного дифракционного кольца стягивается в центральную точку, средняя часть картины оказывается заполненной интерференционными кольцами первых порядков, причем по мере удаления от центра порядок колец сперва уменьшается до нуля, а затем начинает возрастать.

Демонстрация опытов. В качестве узкого и достаточно однородного по ширине кольца правильной формы, позволяющего получить удовлетворительные результаты, в наших опытах использовался кольцевой прорез, сделанный перемещаемым по окружности острием иглы в закопченной стеклянной пластинке после смачивания слоя копоти спиртом и просушивания.

Приведенные ниже на рис. 2 фотографии дифракционных изображений нити лампочки накаливания получены с помощью такого кольца, имевшего диаметр $D \approx 4$ *см* и ширину $d = 0{,}004$ *см*.

Подобным же способом приготовлялся объект дифракции в виде системы двух концентрических прозрачных колец, весьма близких по диаметру и одинаковых по ширине. Дифракционные картины, приведенные на рис. 3, *а* и *б*, получены при помощи двойного кольца с такими параметрами: $D_1 \approx 4{,}8$ *см*, $c_1 \approx 0{,}014$ *см*, $d_1 \approx 0{,}005$ *см*. На рис. 3, *в* изображена фотография дифракционной картины от двойного кольца с бо́льшими значениями D и C.



При проведении опыта с одиночным кольцом приборы располагались по схеме, изображенной на рис. 1. Картина рассматривалась на матовом стекле B, которое перемещалось настолько, чтобы изображение светящегося объекта в нужном порядке было видно достаточно отчетливо. В первых порядках изображение, возникающее при работе в «белом» свете, имеет хорошо заметную окраску (обусловленную хроматической аберрацией кольца), изменяющуюся при перемещении матового стекла B. В более высоких порядках эта окраска выражена все более слабо, поскольку в большей степени сказывается эффект перекрывания изображений,

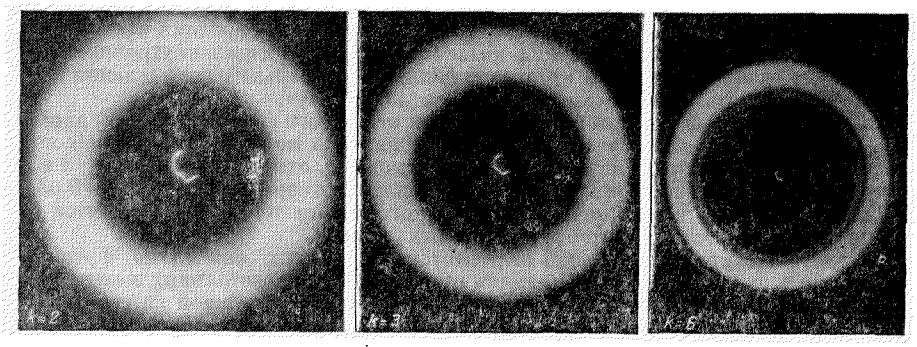


Рис. 2.

создаваемых в одной и той же плоскости различными спектральными компонентами в различных порядках.

Фотографирование картины производилось без применения светофильтра. Матовое стекло предварительно располагалось в такой плоскости, чтобы изображение имело

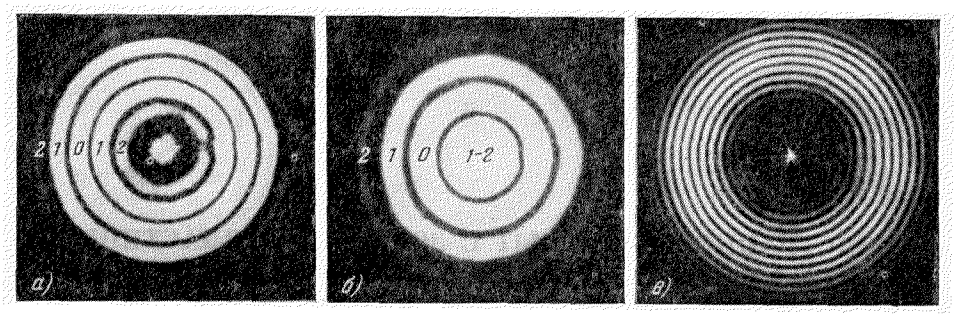


Рис. 3.

окраску, соответствующую длинноволновой части видимого спектра. После этого матовое стекло убиралось и на его место устанавливалась плоская кассета, заряженная изопанхроматической пленкой чувствительностью 90 ед. ГОСТ. С обработанных негативов

контактным печатанием были получены фотографии, размеры дифракционной картины на каждой из которых, очевидно, совпадают с размерами картины на экране B. На рис. 2 приведены фотографии изображений простого объекта — нити лампочки накаливания — в различных порядках ($k = 1, 2, 3, 6$). Расстояние a во всех этих опытах оставалось постоянным и равным 220 *см*, расстояние b изменялось и составляло соответственно: $b_1 \approx 135$ *см*, $b_2 \approx 70$ *см*, $b_3 \approx 40$ *см*, $b_6 \approx 20$ *см*. Все приведенные фотографии сняты при экспозиции $t = 5$ *сек*.

Для получения яркой дифракционной картины при помощи двойного кольца в схему рис. 1 целесообразно ввести собирающую линзу. В наших опытах использовалась линза с фокусным расстоянием 70 *см*, которая располагалась вслед за двойным кольцом. Источником света в этих опытах служило круглое отверстие, освещаемое кинопроекционной лампой. С целью получения более контрастной фотографии источник света при фотографировании прикрывался красным стеклом. (При визуальном наблюдении картины использование светофильтра нежелательно.) Фотографирование картины в этих опытах производилось так же, как и в предыдущих.

На рис. 3, *а* приведена фотография картины, полученной при расстояниях a' — от источника до линзы и b' — от линзы до фотопластинки,— соответственно равных 100 и 90 *см*. На этой фотографии отчетливо видны интерференционные кольца нулевого и первых порядков. Слабое внешнее кольцо второго порядка едва заметно, в то время как внутреннее интерференционное кольцо второго порядка видно вполне отчетливо. Недостатки картины, обусловленные шероховатостью границ объекта дифракции, проявились здесь в заметной форме. Пятно в средней части картины возникает в результате концентрации потока, соответствующего вторичному дифракционному кольцу первого порядка. Фотография на рис. 3, *б* получена при расстояниях a' и b', соответственно равных 100 и 150 *см*. На этой фотографии внешнее интерференционное кольцо второго порядка видно еще слабо, однако лучше, чем на предыдущей. Средняя часть картины возникает в результате перекрывания потоков, соответствующих внутренним интерференционным кольцам первого и второго порядков. При дальнейшем удалении экрана картина, образно выражаясь, «выворачивается наизнанку».

На рис. 3, *в* приведена фотография картины от другого (менее удачного) двойного кольца, имевшего большие значения D и C. Эта картина по своей структуре соответствует той, которая изображена на рис. 3, *а*. Поскольку, однако, отношение c/d в данном случае имеет большую величину по сравнению с предыдущим ($c_2 \approx 0{,}03$ *см*, $d_2 \approx 0{,}005$ *см*), в области главного дифракционного кольца теперь укладывается соответственно большее число интерференционных колец.

Предлагаемые опыты выгодно отличаются от других опытов по френелевой дифракции не только тем, что выполняются при небольших расстояниях между приборами, но также и тем, что для получения отчетливой дифракционной картины не требуется, практически, никакой регулировки приборов. Единственная трудность, преодоление которой требует известного искусства, заключается в изготовлении объектов дифракции в виде одиночного (и тем более двойного) прозрачного кольца достаточно малой и постоянной ширины.

Я. Е. Амстиславский

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Зоммерфельд, Оптика, М., ИЛ, 1953.
2. Р. Вуд, Физическая оптика, М.—Л., ОНТИ, 1936.
3. Р. Поль, Введение в оптику, М., Гостехиздат, 1947.