

Исследование дифракции света

Липовская М.Ю., Яшин Ю.П.

Введение.

Свет может проявлять себя либо как волна, либо как поток частиц, что носит название корпускулярно - волнового дуализма. Интерференция и дифракция - это явления, характеризующие волновую природу света.

С волновой точки зрения свет – это бегущая электромагнитная поперечная волна, в которой колебания векторов E и H ортогональны и происходят синфазно. Если колебания вектора E (и, соответственно, вектора H) происходят хаотично, свет является естественным или неполяризованным, если колебания вектора E упорядочены в пространстве – свет поляризован.

Дифракцией называется явление огибания препятствий световой волной, или, иначе говоря, отклонение от законов геометрической оптики. Дифракция сопровождается перераспределением интенсивности ранее однородного светового потока после прохождения препятствия, то есть интерференцией. Характер распределения интенсивности дифрагированного света зависит от формы фронта волны, пропускаемого преградой, при этом предполагается, что размер преграды порядка длины волны света.

Важным условием для наблюдения интерференции является когерентность источника излучения. Когерентными (или согласованными) называются колебания, совпадающие по частоте и разности фаз. Если колебания вдоль светового луча являются согласованными, то это – продольная или временная когерентность, и расстояние вдоль луча, на котором фаза монохроматического колебания изменилась не более, чем на π , называется длиной когерентности. Если оптические длины пути от разных частей преграды до точки наблюдения различаются больше, чем на длину когерентности, интерференционная картина наблюдаться не будет. Если колебания согласованы поперек пучка света, то это – пространственная или поперечная когерентность, и поперечный размер монохроматического луча, на котором фаза изменилась не более, чем на π , называется радиусом когерентности. Наблюдение интерференции при наложении частей пучка, выходящих за рамки радиуса когерентности, невозможно, поэтому поперечный размер преграды должен быть меньше радиуса когерентности. В качестве источника света для наблюдения волновых эффектов в лабораторной работе используется газовый лазер, обладающий как достаточной длиной когерентности (примерно 5 см), так и большой поперечной когерентностью (все сечение пучка). Также излучение лазера обладает малой расходимостью, что позволяет наблюдать дифракцию в параллельных лучах без использования линз.

1. Дифракция на щели.

Простейшим случаем для изучения дифракции является прохождение света через щель.

Пусть параллельный пучок когерентного света падает нормально на щель, длина которой много больше ее ширины. Согласно принципу Гюйгенса,

каждая точка плоскости щели, до которой дошло световое колебание, становится источником вторичных сферических волн, распространяющихся во всех направлениях. Если эти волны когерентны, они интерферируют при наложении (принцип Гюйгенса-Френеля). Просуммировав вклад волн, приходящих от всех вторичных источников вдоль какого-то направления, можно найти суммарное поле E в любой области экрана (метод интегралов Кирхгофа). Зная, что интенсивность света $I \sim E^2$, можно найти распределение интенсивности по экрану.

Если разность хода Δ от краев щели до какой-то точки на экране равна $\pm k\lambda$, открытую часть волновой поверхности можно разбить на $2k$ параллельные краям элементарные зоны, причем разность хода от краев каждой зоны будет равна $\lambda/2$ (рис.1, $k=1$). Если колебания от них приходят в эту точку экрана в фазе, будет наблюдаться максимум интенсивности (светлое пятно), если колебания приходят в противофазе – минимум интенсивности (темное пятно). Условие минимума интенсивности при взаимодействии двух элементарных зон запишется

$$b \sin \varphi = m\lambda \quad (1)$$

где $m=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ - порядок дифракционного спектра, λ - длина волны.

Условие максимума интенсивности запишется

$$b \sin \varphi = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

где $m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ - порядок дифракционного спектра, λ - длина волны. В центре всегда возникает максимум. Интенсивность света для участков, не соответствующих максимуму или минимуму, рассчитывается с помощью интегралов Кирхгофа. Количество минимумов определяется отношением ширины щели к длине волны. Так как функция синуса не может превышать единицу, получаем

$$\frac{m \lambda}{b} \leq 1 \quad \text{или} \quad m \leq \frac{b}{\lambda}$$

При ширине щели меньше длины волны минимумы вообще не возникают ($m < 1$). В этом случае интенсивность света на экране монотонно спадает от середины к краям и про пучок говорят, что он однородно дифракционно уширен.

Типичная дифракционная картина от щели, полученная на данной лабораторной установке, представлена на рис. 3(а), на рис 3(б) приведено соответствующее ей распределение интенсивности света, полученное методом сканирования.

2. Дифракция на амплитудной дифракционной решетке.

Дифракционной решеткой называется периодический набор одномерных неоднородностей. Если такие неоднородности (полоски) изменяют пропускание света, - это амплитудная дифракционная решетка, если периодически изменяется фаза пучка, например, из-за изменения толщины прозрачного материала, - это фазовая решетка. Если плоская когерентная волна встречает на своем пути такой объект, то при суперпозиции колебаний от всех одномерных полосок, попадающих в пучок, тоже возникает перераспределение интенсивности. Колебания, приходящие от всех неоднородностей, являются когерентными, если они попадают в область поперечной когерентности источника излучения, что выполняется для всего сечения лазерного пучка. Участки со ступенчато изменяющимся пропусканием можно рассматривать как щели. Возникновение разности хода между соседними щелями, отстоящими друг от друга на расстояние d , называемое периодом решетки, демонстрирует рис.2. Условие максимума интенсивности для направлений, вдоль которых колебания от различных щелей при нормальном падении света приходят в фазе, запишется

$$d \sin \varphi = k\lambda \quad (2)$$

где $k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ - порядок дифракционного спектра, λ – длина волны.

Эти максимумы называются главными дифракционными максимумами. Между главными максимумами должны находиться побочные, интенсивность которых гораздо меньше, и они обычно определяют слабый фон освещенности между главными дифракционными максимумами. Для определения величины интенсивности в любой части экрана также используется метод интегралов Кирхгофа. Типичная дифракционная картина после прохождения лучом лазера амплитудной решетки, полученная на данной лабораторной установке, представлена на рис.4(а), на рис 4(б) - соответствующее ей распределение интенсивности света, полученное методом сканирования.

3. Дифракция на компакт-дисках.

Поверхность компакт-диска представляет собой рельефную спиральную дорожку на поверхности полимера, шаг которой соизмерим с длиной волны видимого света. На такой упорядоченной и мелкоструктурной поверхности должны проявляться дифракционные и интерференционные явления, что и является причиной радужной окраски бликов компакт-диска, наблюдаемых в белом свете.

Луч лазера занимает на компакт-диске настолько малую площадь, что этот участок можно считать одномерной дифракционной решеткой (рис.5), причем в этом случае решетка является фазовой. Она характеризуется постоянным шагом d , и условие максимумов определяется по формуле (2) Формула справедлива при нормальном падении луча на прозрачный диск. В случае CD-диска наблюдаются по два дифракционных максимума с каждой стороны

падающего луча, в случае DVD-диска имеется только по одному максимуму с каждой стороны, что определяется различным расстоянием между дорожками. Для наблюдения дифракционных порядков на просвет используются диски со снятым металлическим слоем. В случае металлизированных дисков, применяемых для записи информации, дифракцию можно наблюдать при отражении.

Описание установки

Установка для исследования дифракции параллельного пучка света собрана на оптической скамье (рис.6). Источником когерентного света служит газовый лазер 1. Дифракционные порядки наблюдаются на экране 2, к которому может быть прикреплена миллиметровая бумага. Между экраном и лазером устанавливается рейтер 3 либо с измерительной щелью 4, снабженной микрометрическим винтом, либо с дифракционной решеткой, либо с компакт-диском. Для измерения расстояния между экраном и объектами, на которых наблюдается дифракция, выдается линейка.

Результаты измерений и их обработка

А) Исследование дифракции на щели.

1. Соберите установку, поместив между экраном и лазером щель.
2. Регулировкой ширины щели получите на бумажном экране дифракционную картину. Расстояние между максимумами должно быть удобным для измерения. Пучок лазера должен симметрично перекрывать щель.
3. Измерьте микрометрическим винтом размер щели, запишите результат в протокол.
4. Измерьте с помощью миллиметровой бумаги или линейки расстояния Δx_m всех видимых минимумов (m – номер минимума) от центра нулевого максимума. Запишите результаты в протокол.
5. С помощью линейки измерьте расстояние l от щели до экрана, запишите его в протокол.

Б) Исследование дифракции на плоской дифракционной решетке

1. Соберите установку, поместив между экраном и лазером дифракционную решетку.
2. Получите на бумажном экране дифракционную картину. Расстояние между максимумами должно быть удобным для измерения.

3. Измерьте с помощью миллиметровой бумаги или линейки расстояния Δx_k всех видимых максимумов от центра нулевого максимума. Запишите результаты в протокол.
4. С помощью линейки измерьте расстояние l от щели до экрана, запишите его.

В) Исследование дифракции на компакт-дисках

Все измерения аналогичны измерениям предыдущего пункта, но для получения дифракционной картины необходимо уменьшить расстояние между диском и экраном.

Рекомендации по выполнению отчета

1. Вычислите $tg\varphi_m = \Delta x_m / l$ и соответствующий ему $\sin\varphi_m$ для всех видимых минимумов при измерении дифракции на щели как справа, так и слева от центрального максимума. По формуле (1) вычислите размер щели для всех видимых порядков. Рассчитайте погрешность.
2. Сравните полученное значение с величиной, измеренной микрометрическим винтом.
3. Вычислите $tg\varphi_k = \Delta x_k / l$ и соответствующий ему $\sin\varphi_k$ для всех видимых максимумов при измерении дифракции на решетке как справа, так и слева от центрального максимума. По формуле (2) вычислите период дифракционной решетки для всех видимых порядков. Рассчитайте погрешность.
4. Аналогично п.3 вычислите расстояние между дорожками CD-диска для всех видимых порядков. Рассчитайте погрешность. Вычислите плотность размещения дорожек на миллиметр.
5. Аналогично п.3 вычислите расстояние между дорожками DVD-диска для всех видимых порядков. Рассчитайте погрешность. Вычислите плотность размещения дорожек на миллиметр.
6. Сделайте оценочное сравнение плотности записи информации для этих типов носителей информации.

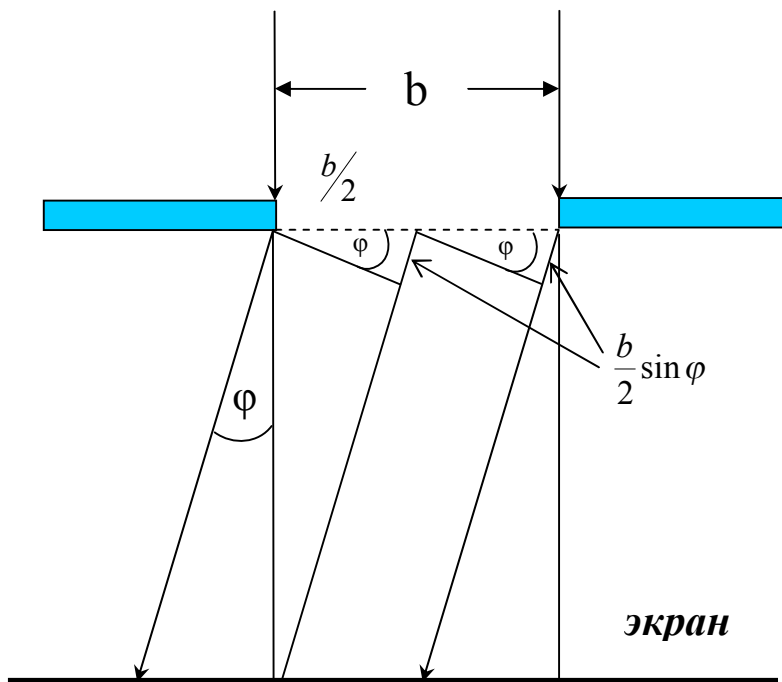


Рис.1

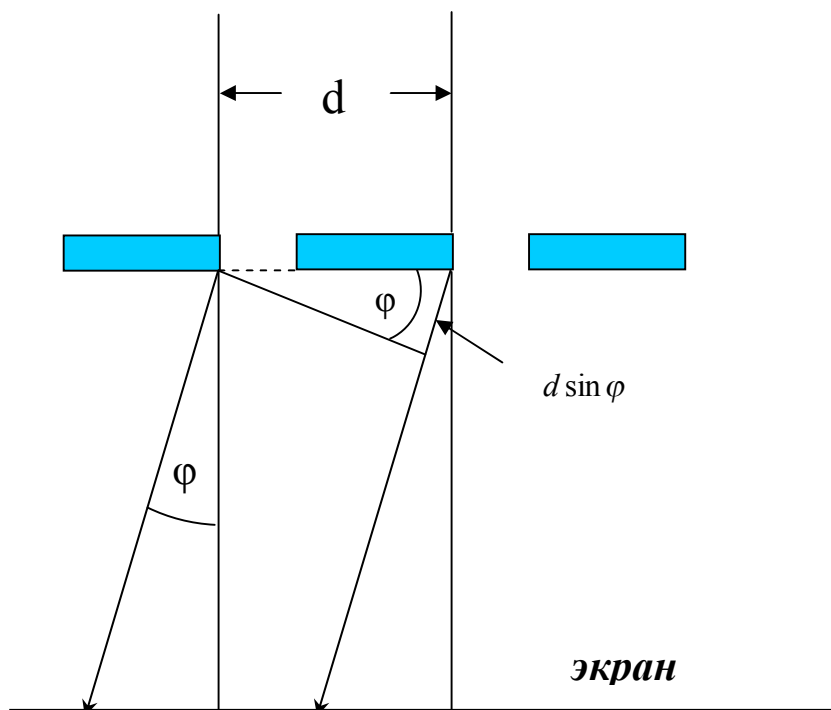


Рис.2

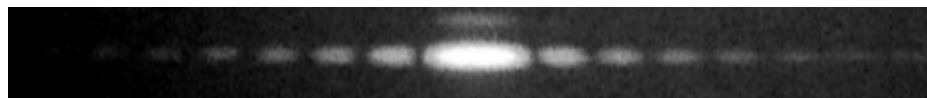


Рис.3(а)

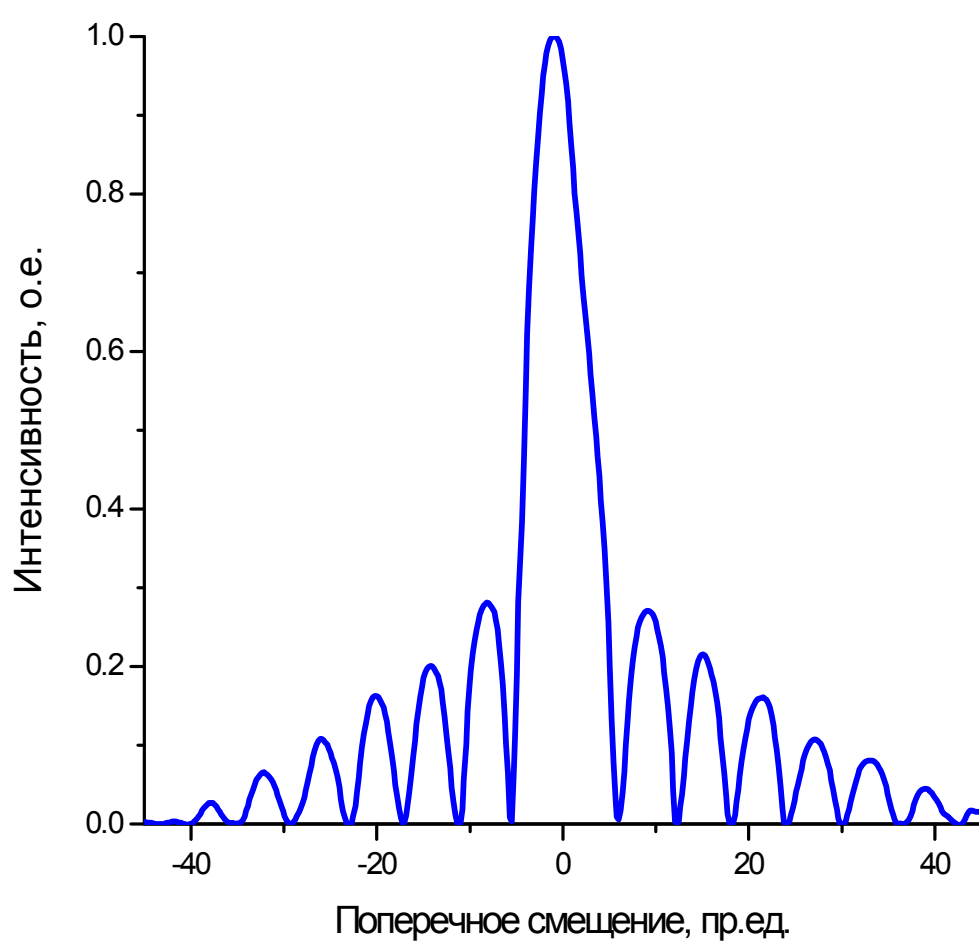


Рис.3(б)



Рис. 4(а)

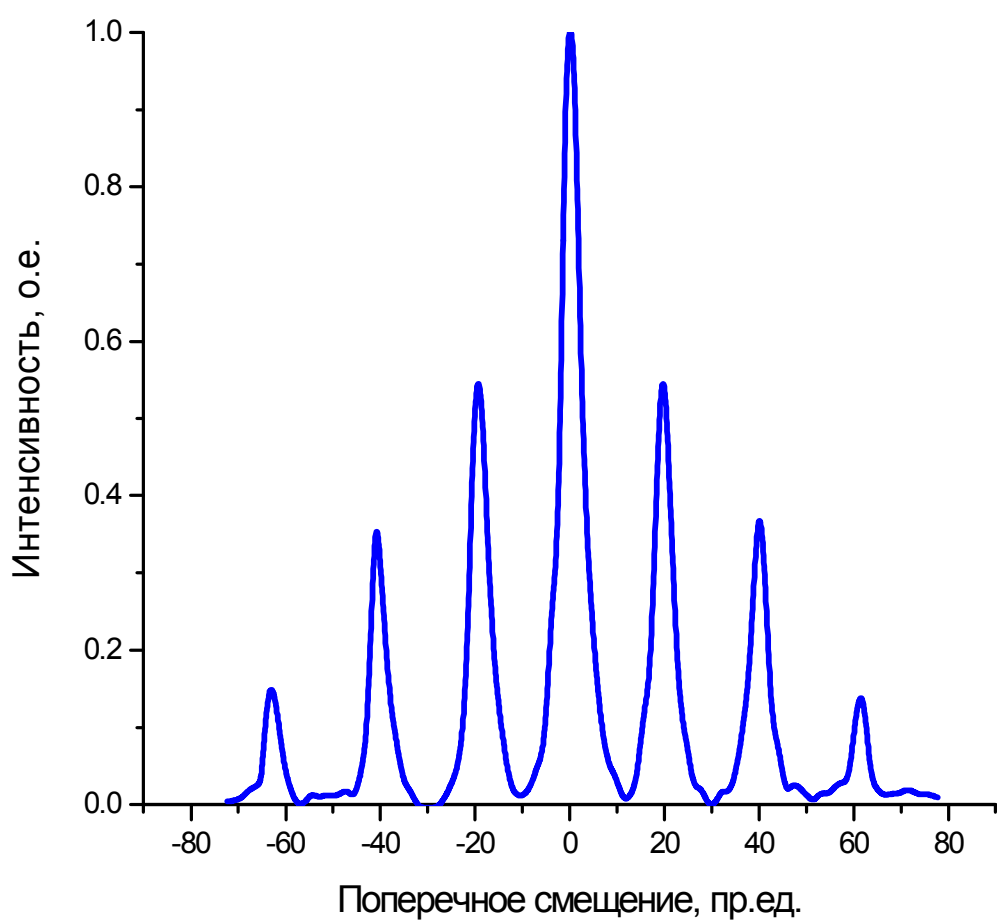


Рис. 4(б)

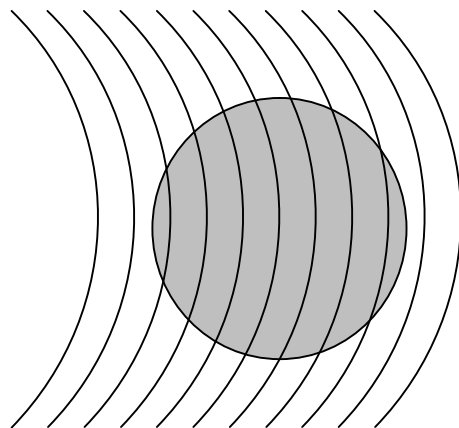


Рис. 5

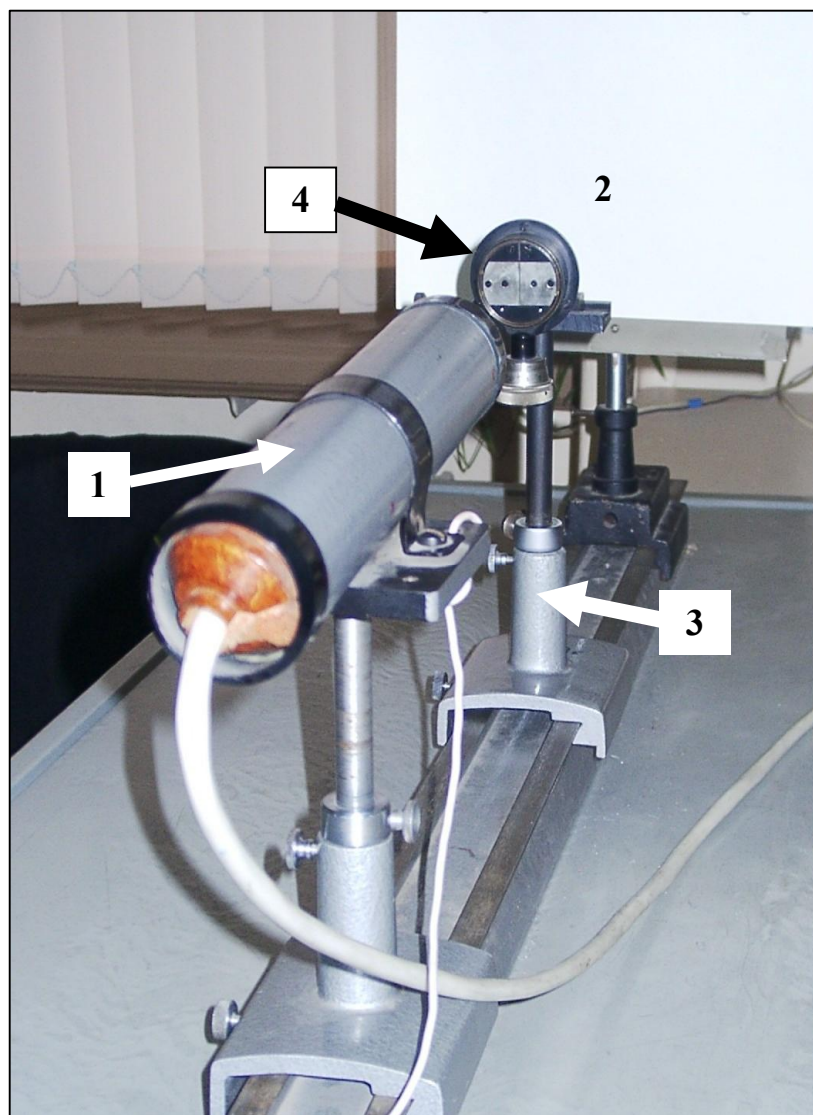


Рис. 6