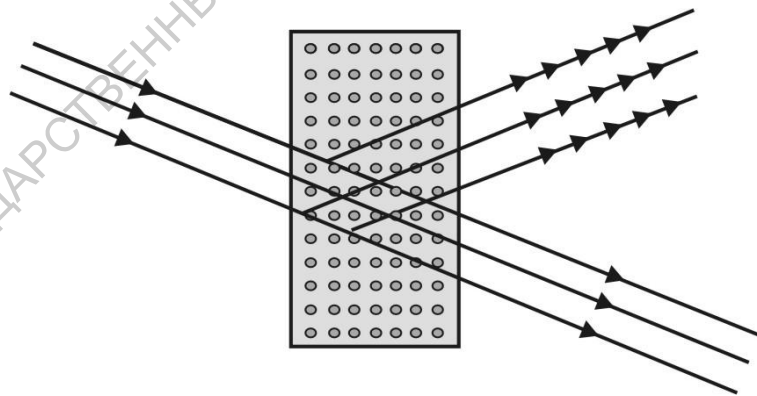


ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ОБЪЕМНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ

Учебно-методическое руководство
к выполнению лабораторной работы



ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского»

Научно-образовательный институт оптики и биофотоники СГУ

Физический факультет

Кафедра оптики и биофотоники

В.П. Рябухо, О.А. Перепелицына

**ДИФРАКЦИЯ СВЕТА
НА ОБЪЕМНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ**

Учебно-методическое руководство
к выполнению лабораторной работы

Саратов

2014 г.

Цель работы: изучение закономерностей дифракции оптических пучков на объемных дифракционных решетках, изучение особенностей дифракции квазимонохроматических пучков на объемных голографических решетках.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Объемные дифракционные решетки

Плоские (поверхностные) решетки – амплитудные и фазовые, изменяют или амплитуду или фазу световой волны в некоторой плоскости или на криволинейной поверхности (вогнутые отражающие решетки). Воздействие решетки на объектную волну происходит на поверхности. Такие решетки могут быть одномерными или двумерными. В первом случае пропускание или отражение решетки изменяется периодически только в одном направлении, во втором – в двух ортогональных направлениях. Например, решетка в виде системы щелей в непрозрачном экране – это одномерная плоская решетка. Если решетка изготовлена в виде системы одинаковых отверстий в экране, периодически расположенных в ортогональных направлениях, то это уже двумерная решетка.

Существуют и трехмерные дифракционные решетки с периодическим распределением элементов по трем направлениям. В таких решетках взаимодействие пучка света и решетки происходит не на поверхности, а в объеме решетки. Поэтому такие решетки еще называют объемными. Объемные решетки могут быть и двумерные и одномерные, когда периодическое изменение оптических свойств среды происходит или только в двух, или только в одном направлениях при постоянстве этих свойств в других ортогональных направлениях. Одномерными объемными решетками служат акустические волны в упругой среде и толстые голографические решетки. Эти типы решеток подробно обсуждаются в настоящей работе.

Дифракция рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке

Естественной трехмерной решеткой может служить кристаллическая среда, в которой атомы и молекулы расположены строго периодически в узлах правильной трехмерной решетки. Периоды расположения узлов такой решетки много меньше длины волны видимого света, но сравнимы с длиной волны рентгеновского излучения ($\lambda \approx 1 \text{ нм}$). Поэтому на таких кристаллических решетках наблюдают дифракцию рентгеновских пучков и по картине дифракции определяют параметры кристаллической структуры.

Дифракция электромагнитной волны на трехмерной решетке происходит во всем объеме решетки, в котором распространяется волна. Теория такой объемной дифракции может быть построена на основе принципа Гюйгенса – Френеля. Каждый отдельный элемент этой решетки (атом или молекула в кристаллической решетке) служит вторичным точечным источником волны. Все вторичные волны складываются с учетом их разности фаз. Дифрагированный пучок образуется в том направлении, для которого все вторичные волны складываются в фазе. Такая теория впервые была разработана Лауэ в начале 20-го века для трехмерных решеток.

Трехмерные решетки можно рассматривать и как двумерные объемные решетки, если рассматривать, например, кристаллическую решетку как систему периодически расположенных плоских двумерных решеток – периодически расположенных атомных слоев. На рис. 1 плоскости YZ с двумерными решетками атомов образуют в направлении оси X объемную двумерную решетку с периодом Λ_x .

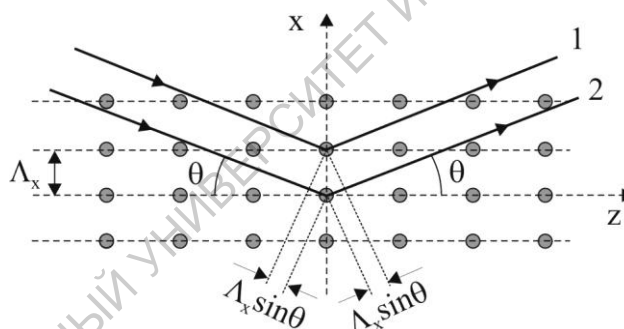


Рис. 1. Дифракция рентгеновских лучей на атомных слоях кристаллической решетки

Если параллельный пучок света распространяется в плоскости XZ под некоторым углом θ к оси Z, а значит и к атомным слоям YZ, то можно получить пучок света, дифрагированный на объемной решетке атомных слоев YZ, расположенных с периодом Λ_x . Условие формирования такого дифрагированного пучка света впервые установлено Вульфом и независимо Брэггом:

$$2\Lambda_x \sin \theta = \lambda, \quad (1)$$

где θ – угол между направлением падающего пучка света и атомным слоем YZ и такой же угол θ между направлением дифрагированного пучка и тем же атомным слоем YZ. Лучи света как бы отражаются от периодической системы атомных слоев YZ, но интерференционное усиление отраженных волн происходит не для всех углов θ и длин волн λ , а только для тех, которые удовлетворяют уравнению Вульфа – Брэгга (1). Разность

хода волн, отраженных от соседних слоев, должна быть равной длине волны λ для интерференционного усиления этих волн. Разность фаз для таких волн равна 2π радиан, что определяет сфазированность этих волн и, соответственно, их интерференционное усиление.

Согласно рис. 1 разность хода Δ_{12} между лучами 1 и 2, отраженными соседними слоями, равна

$$\Delta_{12} = \Lambda_x \cdot \sin \theta + \Lambda_x \cdot \sin \theta. \quad (2)$$

Приравнявая λ правую часть (2), получаем уравнение Вульфа – Брэгга (1).

В приведенном расчете разности хода рассматривались параллельные лучи вторичных волн, интерференция которых наблюдается на бесконечности. В реальности наблюдается наложение и интерференция этих волн на достаточно большом расстоянии от решетки по сравнению с ее периодом, на котором непараллельность лучей можно считать пренебрежимо малой и не учитывать ее для расчета разности хода волн Δ_{12} .

Уравнение (1) можно получить, рассматривая несколько иную схему наложения вторичных волн, изображенную на рис. 2. В этой схеме наложение и интерференция вторичных волн рассматривается уже в непосредственной близости от решетки.

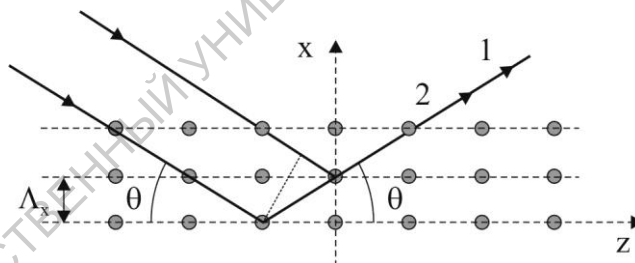


Рис. 2. Сложение и интерференция волн, дифрагированных решеткой атомов кристалла

При дифракции волн на объемной решетке, как и при дифракции на плоской решетке, наблюдается интерференция множества вторичных волн – многолучевая интерференция, при которой интенсивность дифрагированного пучка пропорциональна квадрату числа элементов решетки N , $I \sim N^2$, находящихся в пределах объема пересечения падающего пучка с дифракционной решеткой (рис. 3).

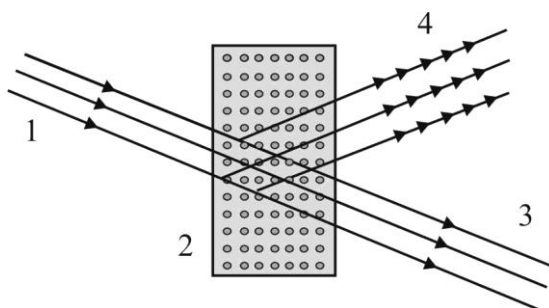


Рис. 3. Дифракция волн на трехмерной решетке как результат многолучевой интерференции

Уравнение Вульфа-Брэгга можно получить и для удвоенного, утроенного и т.д. периодов одномерной объемной решетки

$$2p\Lambda_x \sin \theta = \lambda, \quad (3)$$

где $p = 1, 2, 3, \dots$. Тогда для $p = 2$ угол дифракции θ будет меньше, чем для $p = 1$, $\sin \theta = \lambda / 2p\Lambda_x$. Однако в этом случае интенсивность дифрагированного пучка будет в p^2 -раз меньше, поскольку уменьшится в p -раз число интерферирующих волн.

Свойства объемных дифракционных решеток

Отличительная особенность дифракции электромагнитной волны на объемной решетке по отношению к дифракции на поверхностной решетке заключается в формировании только одного порядка дифракции, направление распространения которого θ определяется уравнением Вульфа – Брэгга.

При падении на решетку пучка монохроматических лучей по различным направлениям распространения (рис. 4) будет наблюдаться только тот дифрагированный луч, направление распространения которого удовлетворяет уравнению Вульфа – Брэгга (1). Это свойство объемных решеток называется *угловой селективностью*.

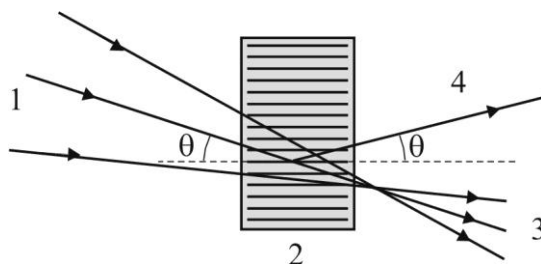


Рис. 4. Угловая селективность объемной дифракционной решетки

Уравнение Вульфа – Брэгга определяет также и *спектральную селективность* объемных дифракционных решеток. Если на решетку падает параллельный пучок с широким спектром длин волн (рис. 5), то дифрагируют волны только определенной длины волны λ , удовлетворяющей уравнению (1). Объемная дифракционная решетка работает как интерференционный фильтр.

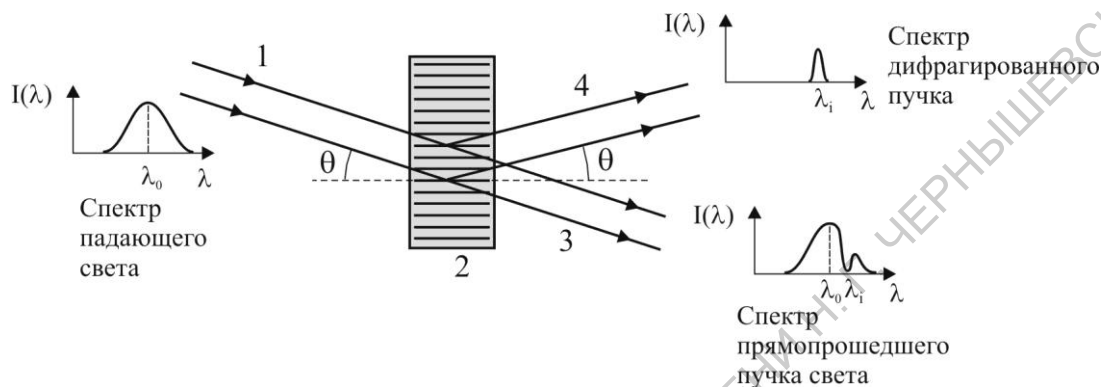


Рис. 5. Спектральная селективность при дифракции света на объемной решетке

Угловая и спектральная селективность объемных решеток в значительной степени определяются относительной толщиной решетки, выражаемой отношением геометрической толщины к периоду решетки h/Λ . Чем больше это отношение, тем острее проявляется селективность решетки.

Дифракция на акустических волнах

В видимом диапазоне длин волн можно наблюдать дифракцию электромагнитных волн на бегущих или стоячих акустических волнах ультразвуковых частот в жидкостях или в твердых прозрачных телах. Продольная акустическая волна создает в среде распространения волну сжатия и растяжения, что приводит к образованию периодического в пространстве и во времени изменения показателя преломления среды вдоль направления распространения акустической волны:

$$n(x, t) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_a} x - 2\pi f_a t\right), \quad (4)$$

где n_0 – показатель преломления невозмущенной среды, Δn – амплитуда изменения показателя преломления, f_a – частота акустической волны, t – время, x – координата вдоль направления распространения, $\Lambda_a = V_a/f_a$ – длина акустической волны, V_a – скорость распространения акустических колебаний.

Если длина акустической волны Λ_a сравнима с длиной световой волны, то среда с акустической волной может служить фазовой дифракционной решеткой, на которой можно наблюдать дифракцию пучков света. Такая дифракционная решетка будет объемной, если толщина среды h , в которой распространяется акустическая волна, существенно больше длины акустической волны Λ_a , $h \gg \Lambda_a$.

Акустическую волну в среде можно возбудить с помощью пьезоэлектрического преобразователя (рис. 6), на который подается переменное напряжение $U(t)$ частотой $f_s = f_a$.

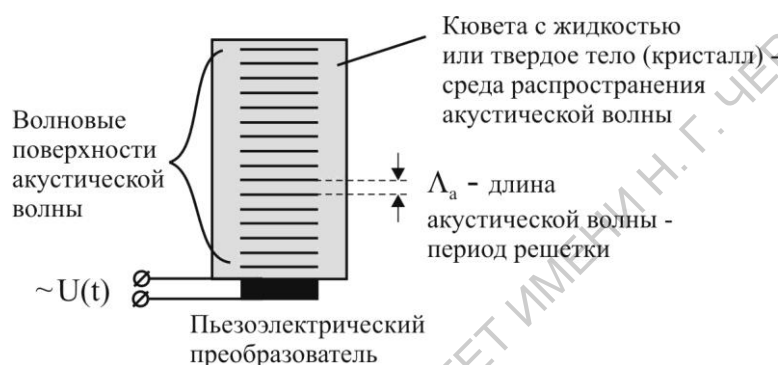


Рис. 6. Возбуждение акустической волны в жидкости или твердом теле

В качестве среды может быть использована жидкость, например, вода ($V_a=1483$ м/с), глицерин ($V_a=1920$ м/с), или твердое тело, например, кристаллический кварц SiO_2 ($V_a=6320$ м/с), плавленный кварц SiO_2 ($V_a=5960$ м/с) или кристалл ниобата лития LiNbO_3 ($V_a=6550$ м/с).

Если грань среды, противоположная пьезоэлектрическому преобразователю отражает акустическую волну в противоположном направлении, то в среде распространяются встречные волны, интерференция которых приводит к формированию стоячей волны:

$$\begin{aligned}
 n(x) &= n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_a} x - 2\pi f_a t\right) + \Delta n \cos\left(-\frac{2\pi}{\Lambda_a} x - 2\pi f_a t\right) = \\
 &= n_0 + 2\Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_a} x\right) \cos(2\pi f_a t).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Стоячая акустическая волна также может служить объемной дифракционной решеткой с периодом Λ_a . В определенные моменты времени $t = (2m+1)/4f_a$ такая решетка исчезает $n(x) = n_0 = \text{const}$ и в эти моменты времени будет отсутствовать дифракция света. Следовательно, интенсивность дифрагированного на такой решетке

пучка света будет периодически меняться с частотой $f = 2f_a$. Дифрагированный на бегущей акустической волне пучок света имеет постоянную интенсивность, но оптическая частота этого пучка отличается от оптической частоты падающего света ν_0 вследствие эффекта Доплера на частоту акустической волны $\nu = \nu_0 \pm f_a$.

На рис. 7 показана схема дифракции параллельного пучка света на акустической волне как на объемной дифракционной решетке при выполнении условия Вульфа – Брэгга. Лучи света отражаются от волновых поверхностей акустической волны, совпадающих с максимумами показателя преломления среды. Эти отраженные волны будут сфазированы, если выполняется уравнение (1), которое для акустической волны можно записать в виде

$$2\Lambda_a \sin \theta' = \lambda, \quad (6)$$

где Λ_a – период решетки, θ' – скользкий угол падения лучей света на волновые поверхности, λ – длина волны света в среде.

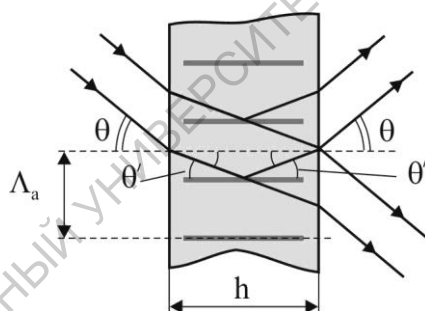


Рис. 7. Дифракция Вульфа – Брэгга на акустической волне в среде толщиной h

Это уравнение эквивалентно уравнению для угла падения θ на границу воздух – среда и длины волны света в воздухе λ_0

$$2\Lambda_a \sin \theta = \lambda_0. \quad (7)$$

Действительно, используя закон преломления $\sin \theta = n_0 \sin \theta'$, где n_0 – показатель преломления невозмущенной среды, и выражение для длины волны в среде $\lambda = \lambda_0/n_0$, уравнение (4) преобразуется к виду (6).

Уравнение (7) также можно считать уравнением Вульфа – Брэгга для дифракции света на объемной дифракционной решетке в некотором слое среды.

Дифракция света на объемной голографической решетке

Важное практическое значение имеет дифракция света на объемных голографических решетках, образующихся при записи интерференционного поля в относительно толстых фоточувствительных средах (в частности, в слоях галогенидосеребряных эмульсий). Одномерные объемные голографические решетки образуются при записи интерференционного поля при наложении двух плоских световых волн, сходящихся под некоторым углом 2θ (рис. 8).

Интерференция таких волн приводит к формированию интерференционного поля в области их пересечения (наложения). Максимумы и минимумы интенсивности этого интерференционного поля образуют систему плоскостей, параллельных биссектрисе угла схождения волн 2θ , с периодом расположения

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 \sin \theta}. \quad (8)$$

Если в это интерференционное поле поместить слой фоточувствительной среды с показателем преломления n_0 и толщиной h , то внутри слоя период расположения плоскостей интерференционных максимумов Λ' будет тем же, что и вне слоя в воздухе. Действительно, в результате преломления лучей света угол схождения волн θ' станет меньше, $\sin \theta = n_0 \sin \theta'$, но и длина волны λ в слое в n_0 -раз меньше, чем в воздухе, $\lambda = \lambda_0/n_0$, так что $\Lambda' = \Lambda$.

Экспонирование фоточувствительного слоя интерференционным полем и последующая его фотохимическая обработка (проявление, закрепление) приводит к образованию пространственного периодического изменения оптических свойств фотослоя с периодом Λ . При использовании наиболее распространенных в голографии галогенидосеребряных фоточувствительных слоев на стеклянных пластинах в максимумах интерференционного поля образуется черное серебро. Специальная фотохимическая обработка экспонированного фотослоя – отбеливание, приводит к изменению показателя преломления фотослоя в засвеченных и незасвеченных местах и, соответственно, к формированию пространственного периодического изменения показателя преломления фотослоя и образованию объемной дифракционной решетки (рис.8г). Такая объемная решетка во многом подобна решетке, образованной акустической волной в упругой прозрачной среде.

Для получения объемной решетки период интерференционных полос Λ должен быть существенно меньше толщины фотослоя h , $h/\Lambda \gg 1$.

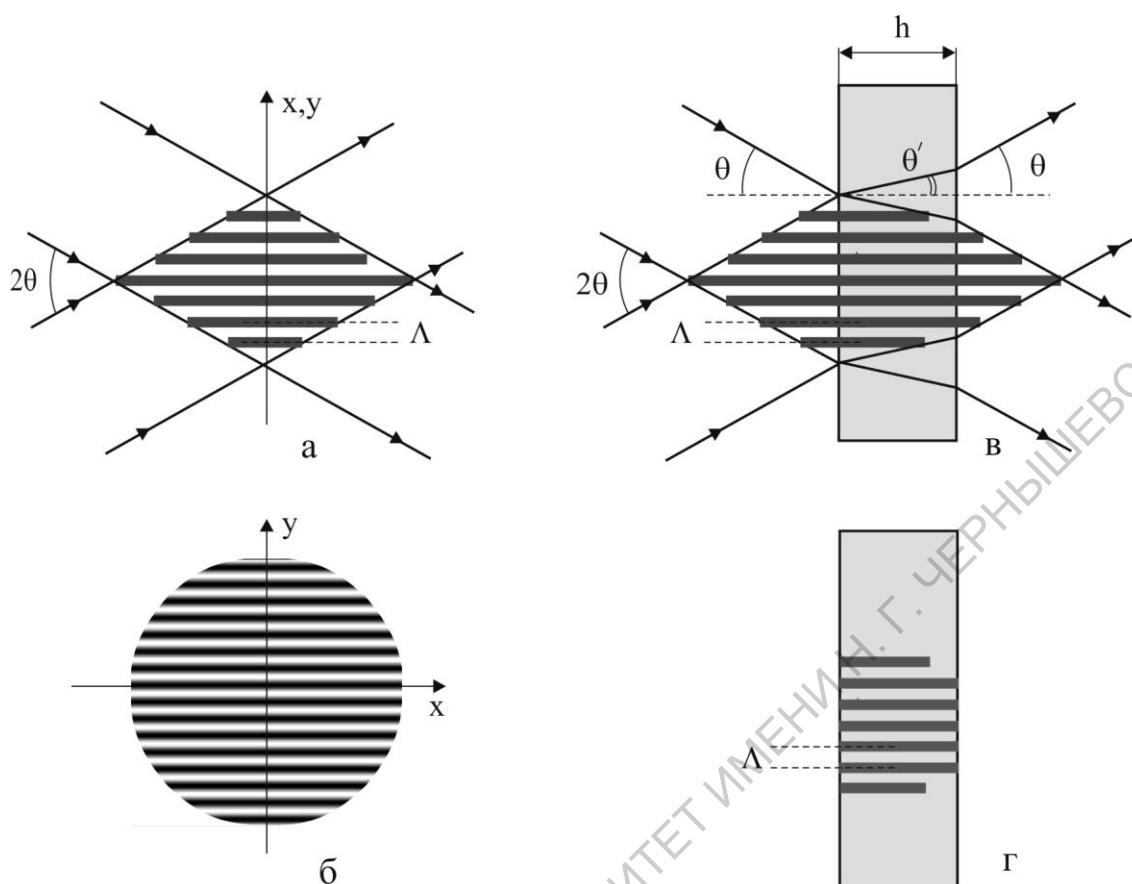


Рис. 8. Образование (а,б) и запись (в) интерференционного поля, образующегося при наложении двух плоских световых волн, и получение объемной дифракционной решетки (в,г)

Схема дифракции световой волны на голографической решетке практически совпадает со схемой дифракции на акустической волне. Отличия носят только количественный характер. Период голографической решетки Λ во много раз может быть меньше периода акустической волны Λ_a . Поэтому с голографическими решетками возможно наблюдение дифракции под существенно большими углами дифракции θ .

Кроме этого, в голографии возможна запись интерференционного поля, ориентированного не перпендикулярно граням фотослоя, а под некоторым углом α к этим граням (рис. 9). В этом случае получается дифракционная решетка, у которой периодическая структура не перпендикулярна граням фотослоя и это проявляется ориентации голографической решетки, необходимой для наблюдения дифрагированного пучка света.

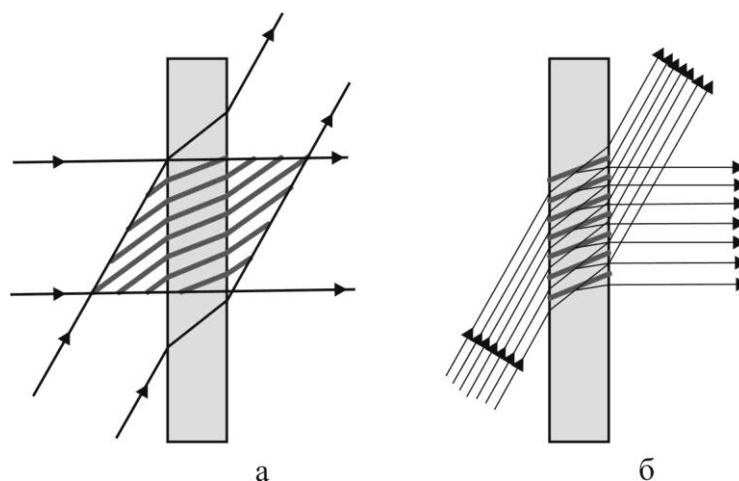


Рис. 9. Запись голографической решетки (а), периодическая структура которой не перпендикулярна граням фотослоя, и схема дифракции пучка света на такой решетке (б)

В схеме на рис.9а один из интерферирующих пучков света падает нормально на фотопластинку, а второй - под некоторым углом. В результате интерференционные полосы, параллельные биссектрисе угла между этими пучками, оказываются ориентированными под соответствующим углом к поверхности фоточувствительного слоя фотопластинки. При освещении полученной таким образом дифракционной решетки пучком света, совпадающим по направлению со вторым пучком на этапе записи, дифрагированный пучок имеет направление, совпадающее с направлением первого пучка на этапе записи дифракционной решетки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приборы и принадлежности:

- источники света – полупроводниковый лазер с блоком питания от сети 220 В,
- светодиоды синего, зеленого и красного цветов излучения с блоком автономного питания 1,5 В;
- набор объемных голографических решеток с различными периодами дифракционной структуры;
- стенд для наблюдения эффектов дифракции световых пучков на объемной дифракционной решетке, включающий:
 - устройство крепления источника света и юстировки направления светового пучка;
 - зажим для крепления дифракционной решетки, расположенный на кольцевой платформе, имеющей возможность поворота в вертикальной плоскости и изменения ориентации дифракционной решетки относительно освещающего пучка света;
 - экран на внешней кольцевой платформе.

Оптическая схема установки для изучения эффектов дифракции пучков света на тонкой и объемной голографических решетках приведена на рис. 10, где показаны только источник света, освещающий и дифрагированный пучки света, дифракционная решетка и экран со шкалой угловой меры.

При дифракции на объемной решетке пучок квазимонохроматического света со средней длиной волны λ_0 падает на решетку под некоторым углом α_0 (рис.10а). Для появления дифрагированного пучка света, распространяющегося под углом β к направлению падающего пучка необходимо выполнение уравнения Вульфа – Брэгга (1).

Поворотом дифракционной решетки и, соответственно, изменением угла падения α_0 можно добиться выполнения этого уравнения, о чем будет свидетельствовать появление дифрагированного пучка света максимальной интенсивности.

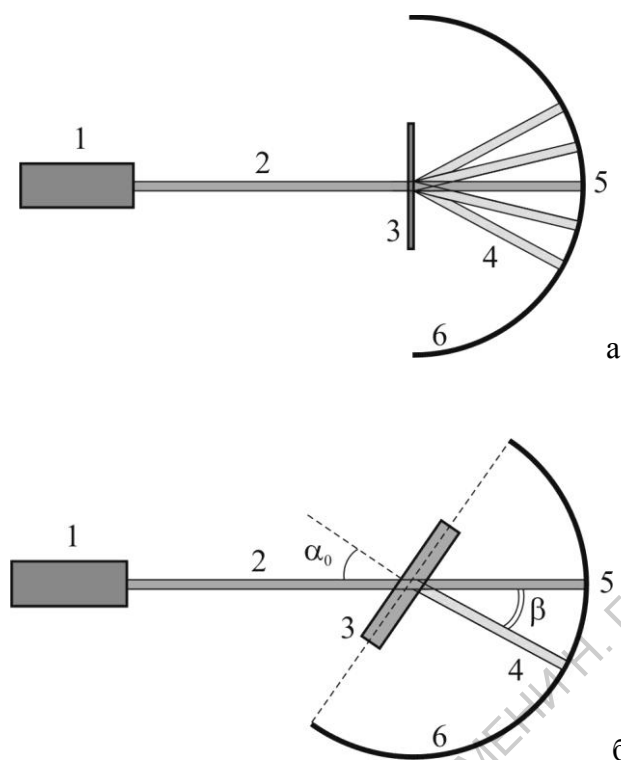


Рис. 10. Оптическая схема экспериментальной установки для наблюдения дифракции света на тонкой (а) и объемной (б) дифракционных решетках:
 1 – источник света; 2 – освещающий пучок света; 3 – голографическая решетка (тонкая или объемная); 4 – дифрагированный пучок света; 5 – недифрагированный пучок света (нулевой порядок дифракции); 6 – экран со шкалой угловой меры

Если дифракционная структура голографической решетки такова, что плоскости постоянного значения показателя преломления фотослоя n перпендикулярны граням решетки (см. рис.8) и перпендикулярны плоскости падения пучка света на решетку, то уравнение Вульфа – Брэгга (1) с использованием углов α_0 и β можно записать в виде

$$2\Lambda \sin \alpha_0 = \lambda_0, \quad (9)$$

или в эквивалентном виде

$$2\Lambda \sin(\beta/2) = \lambda_0. \quad (10)$$

Измеряя в эксперименте угол β , можно определить пространственный период Λ дифракционной структуры решетки при известной длине волны λ_0 используемого пучка света. Для определения угла дифракции β служит экран 6 (рис. 10) со шкалой угловой меры.

Схема экспериментальной установки для изучения эффектов дифракции пучков света на объемной голографической решетке приведена на рис. 11. Фотография внешнего вида установки приведена на рис. 12.

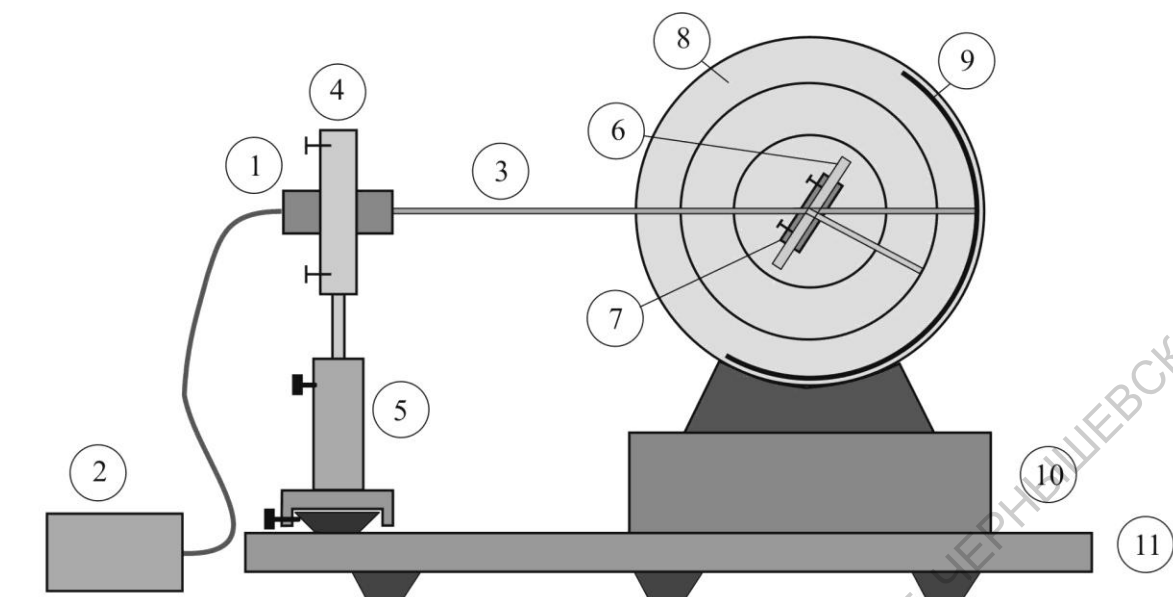


Рис. 11. Схема экспериментальной установки: 1 – источник света; 2 – блок питания источника света; 3 – пучок света; 4 – устройство крепления источника света и регулировки направления светового пучка; 5 – рейтер на рельсе; 6 – объемная голографическая решетка; 7 – зажим крепления решетки; 8 – внешняя кольцевая платформа с возможностью поворота в вертикальной плоскости; 9 – экран со шкалой угловой меры в градусах; 10 – основание для крепления вертикальной платформы; 11 – деревянная подставка на ножках

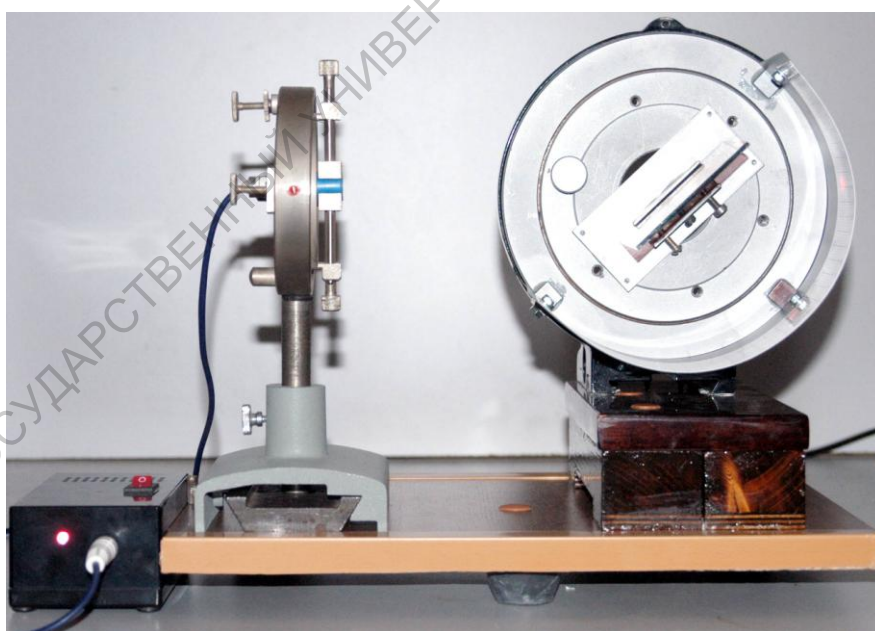


Рис. 12. Внешний вид экспериментальной установки

Задание 1. Определить период Λ тонкой одномерной дифракционной решетки по измерениям углов дифракции пучка света с известной длиной волны λ_0 .

Порядок выполнения задания:

1. Установить тонкую одномерную голографическую дифракционную решетку в зажим на вертикальной платформе.
2. Установить источник света в устройстве крепления источника и регулировки направления пучка света. Используя регулировочные винты устройства направить пучок света приблизительно в центр дифракционной решетки.
3. Повернуть вертикальную платформу вместе с дифракционной решеткой таким образом, чтобы пучок падал перпендикулярно плоскости решетки, и наблюдались дифрагированные пучки света, распространяющиеся симметрично относительно недифрагированного (прямошедшего) пучка света. Поворот всей платформы необходимо производить двумя руками за ребристую внешнюю поверхность кольцевой платформы.
4. Определить углы дифракции β_1 и β_{-1} , β_2 и β_{-2} для ± 1 и ± 2 порядков дифракции. По формуле для главных максимумов дифракции определить период Λ такой дифракционной решетки.
5. Проанализировать изменение дифракционной картины (изменение углов дифракции и интенсивностей дифрагированных пучков) при изменении угла падения пучка света на тонкую решетку при повороте вертикальной платформы вместе с решеткой.

Задание 2. Определить период Λ объемной одномерной голографической дифракционной решетки по измерениям угла дифракции пучка света с известной длиной волны λ_0 .

Порядок выполнения задания:

1. Вместо тонкой дифракционной решетки установить объемную одномерную голографическую решетку. Проанализировать картину дифракции (направления дифрагированных пучков и их интенсивность) при различных углах падения пучка света на решетку.
2. Определить угол дифракции β и угол падения α_0 при наблюдении дифрагированного пучка максимальной интенсивности. Определить угол дифракции

β_2 и соответствующий угол падения $\alpha_2 < \alpha_0$ при наблюдении вторичного дифрагированного пучка света с меньшей интенсивностью.

3. Используя уравнение Вульфа – Брэгга и измеренные значения углов α_0 и β , определить период Λ дифракционной структуры объемной голографической решетки.
4. Проанализировать с физической точки зрения различия в процессах дифракции света на тонкой и объемной дифракционных решетках.

Задание 3. Проверить справедливость уравнения Вульфа – Брэгга, используя в эксперименте несколько источников с разными длинами волн.

Порядок выполнения задания.

1. Закрепить голографическую дифракционную решетку в зажиме на вертикальной платформе.
2. Установить источник $S1$ красного цвета с длиной волны λ_1 .
3. Используя винты регулировки устройства направить пучок света приблизительно в центр дифракционной решетки.
4. Повернуть вертикальную платформу вместе с решеткой до появления дифрагированного пучка максимальной интенсивности.
5. Определить угол падения пучка света на решетку α_1 , угол дифракции β_1 .
6. Повторить пункты 2 – 5 с источником $S2$ зеленого цвета с длиной волны λ_2 и с источником света $S3$ синего цвета с длиной волны λ_3 . Определить углы α_2 и β_2 , α_3 и β_3 .
7. С использованием уравнения Вульфа – Брэгга определить Λ_1 , Λ_2 и Λ_3 периоды дифракционной решетки по данным измерений углов со всеми тремя источниками света и сопоставить полученные значения периодов.

Задание 4. Определить угол дифракции пучка света на объемной голографической решетке с удвоенным периодом.

Порядок выполнения задания.

1. Закрепить голографическую дифракционную решетку в зажиме на вертикальной платформе.

2. Установить и закрепить источник света – полупроводниковый лазер.
3. Поворотом вертикальной платформы добиться максимальной интенсивности дифрагированного пучка света.
4. Определить углы α_1 и β_1 .
5. Поворачивая платформу, наблюдать вторичный максимум дифрагированного пучка при другом угле падения $\alpha_2 < \alpha_1$.
6. Определить углы α_2 и β_2 .
7. Получить третий дифрагированный пучок при $\alpha_3 < \alpha_2 < \alpha_1$ и определить углы α_3 и β_3 .
8. Рассчитать по значениям углов α_1 и β_1 период Λ , а по значениям α_2 и β_2 удвоенный период решетки $\Lambda_2 = 2\Lambda$, по значениям α_3 и β_3 тройной период решетки $\Lambda_3 = 3\Lambda$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое одномерная и двумерная дифракционная решетка; как устроена трехмерная решетка; что собой представляет объемная одномерная и объемная двумерная дифракционная решетка?

2. Записать уравнение для главных максимумов дифракции света на тонкой одномерной решетке.

3. Записать уравнение для дифракции пучка электромагнитной волны на объемной одномерной решетке.

4. Почему акустическая волна в упругой среде может служить в качестве объемной одномерной решетки? Какова должна быть частота и скорость акустической волны, чтобы на ней можно было бы наблюдать дифракцию пучка света видимого диапазона?

5. Каким образом можно создать с помощью акустической волны объемную двумерную и трехмерную решетки?

6. В чем заключается отличие дифракции пучка света на бегущей акустической волне от дифракции на стоячей акустической волне?

7. Что представляет собой тонкая и объемная голографическая решетка? Каким образом получается голографическая решетка? Записать уравнение для расчета периода объемной голографической решетки.

8. Каким образом можно получить двумерную тонкую и двумерную объемную голографические решетки?

9. Показать, используя формулу для периода интерференционных полос, уравнения для закона преломления и условие Вульфа – Брэгга, что пучок света, дифрагированный на объемной голографической решетке, совпадает по направлению с одним из интерферирующих пучков света, использованных на этапе записи решетки.

10. Какими свойствами обладают объемные одномерные решетки, отличающие их от одномерных тонких решеток?

11. В чем заключается спектральная и угловая селективность объемных дифракционных решеток? При каких условиях эти свойства имеют наиболее выраженный характер?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Бутиков Е.И. Оптика. – С.-Петербург: Невский Диалект: БХВ-Петербург. 2012. – 480 с. <http://e.lanbook.com/view/book/2764/>
2. Ландсберг Г.С. Оптика. Издание 5-е. – М.: Наука, 2006. – 928 с.

Дополнительная литература:

1. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика: Учебник. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 656 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.