

Министерство науки и высшего образования Российской
Федерации

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра физики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛН СПЕКТРОВ АТОМОВ РТУТИ И
ВОДОРОДА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ**

Методические указания к лабораторной работе для студентов
всех специальностей

2020

Министерство науки и высшего образования Российской
Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ
Зав. каф. физики,
д-р техн. наук, проф.
_____ Е.М.Окс

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛН СПЕКТРОВ АТОМОВ РТУТИ И
ВОДОРОДА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Методические указания к лабораторной работе для студентов
всех специальностей

Рецензент:
д-р техн. наук, профессор
_____ А.С. Климов

Разработчики:
вед. инженер
_____ Н.П. Кондратьева
к.ф-м наук, доцент
_____ В.И. Быков

2020

ВВЕДЕНИЕ

Дифракционными называются явления, обусловленные волновой природой света и наблюдаемые при распространении света в средах с резко выраженной оптической неоднородностью, и связанные с отступлениями от законов геометрической оптики. По сути, дифракция является результатом интерференции вторичных волн. Дифракционные явления наиболее сильно выражены для препятствий, сравнимых с длиной волны света. Условно различают дифракцию в параллельных лучах или дифракцию Фраунгофера и дифракцию в расходящихся (сходящихся) лучах или дифракцию Френеля.

Дифракционные явления количественно могут быть описаны с помощью принципа Гюйгенса-Френеля, согласно которому амплитуда результирующего колебания в рассматриваемой точке формируется в результате взаимной интерференции вторичных волн, испущенных каждым элементом площади предыдущего волнового фронта. Все точки фронта волны колеблются с одинаковой частотой и в одинаковой фазе и, следовательно, представляют собой совокупность когерентных источников, световые волны от которых, распространяясь вперед, интерферируют друг с другом.

Следовательно, принцип Гюйгенса-Френеля все дифракционные задачи сводит к нахождению результата интерференции бесчисленного множества вторичных волн, что приводит к необходимости вычисления довольно громоздких интегралов. Для упрощения вычислений Френелем был предложен метод разделения фронта волны на зоны (зоны Френеля) таким образом, что волны от соседних зон в точку наблюдения приходят в противоположных фазах (с разностью фаз, равной π , или оптической разностью хода, равной $\lambda/2$) и взаимно ослабляют друг друга. Конечный результат зависит от того, сколько зон участвует в создании результирующей амплитуды в выбранной точке наблюдения: если число зон нечетное, будет наблюдаться максимум, если четное - минимум.

Целью данной работы является *изучение дифракционной картины* от одномерной дифракционной решетки, и *определение длин волн* наиболее интенсивных линий спектра ртути или водорода.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Дифракционная решетка представляет собой правильную структуру из N параллельных щелей (рисунок 1.1а) с шириной каждой щели, равной b , и расстоянием d между соседними щелями (расстояние d называется *постоянной* или *периодом решетки*).

Пусть на дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает плоская монохроматическая волна. Колебания происходят в одинаковой фазе во всех точках щелей, ибо находятся на одной и той же волновой поверхности. В одном направлении все щели решетки излучают свет одинаково, амплитуды колебаний, вызываемых каждой щелью в данной точке равны по величине, а сдвиг фаз между амплитудами соседних щелей определяется оптической разностью хода Δ от сходственных точек B и D двух соседних щелей. Тогда в направлениях, в которых оптическая разность хода Δ , кратна целому числу длин волн λ , будут наблюдаться *главные максимумы* при выполнении условия:

$$\Delta = d \cdot \sin \varphi = \pm m \cdot \lambda, \quad (1.1)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ – порядок главного максимума; φ – угол дифракции.

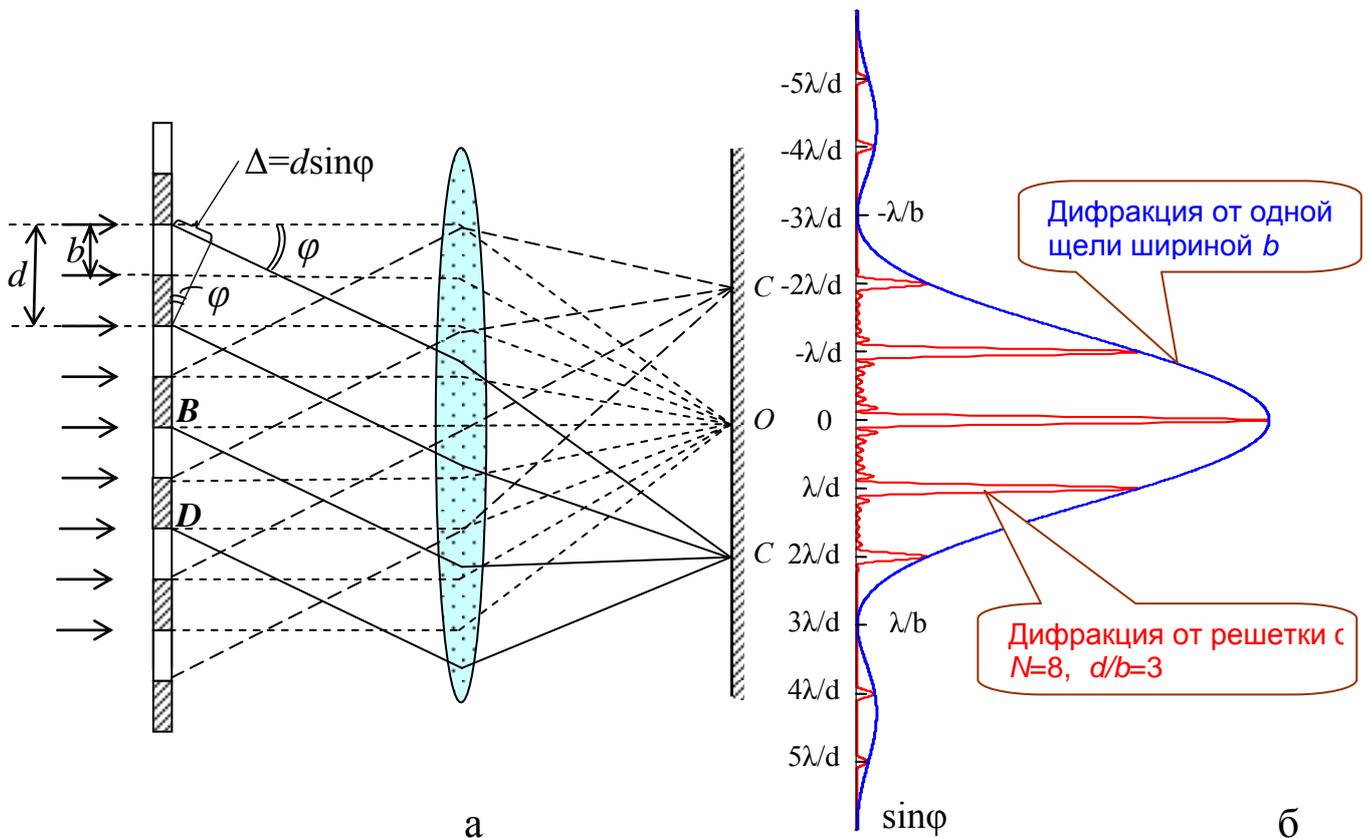


Рисунок 1.1 – Схема дифракции (а) и распределение интенсивности в дифракционной картине (б)

Главные минимумы соответствуют таким углам φ , при которых свет от разных частей каждой отдельной щели полностью погашается в результате интерференции, то есть условие главных минимумов такое же, как и при дифракции на одной щели:

$$b \cdot \sin\varphi = \pm n \cdot \lambda, \quad (1.2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – порядок главного минимума.

Условие минимума (1.2) легко получается, если учесть, что в направлении минимумов на ширине щели b укладывается четное число зон Френеля.

Кроме главных максимумов имеется $N-2$ очень слабых побочных (вторичных) максимумов, и $N-1$ дополнительных минимумов. Дополнительные минимумы удовлетворяют условию:

$$d \cdot \sin\varphi = \pm p \cdot \lambda / N, \quad (1.3)$$

где p принимает любые целые положительные значения, кроме 0, N , $2N$, $3N$ и так далее.

На рисунке 1.1а,б приведены схема дифракции и распределение интенсивности в дифракционной картине. Видно, что интенсивности главных максимумов модулируются дифракцией от одной щели.

При увеличении числа щелей дифракционной решетки наблюдается многолучевая интерференция на правильной структуре решетки, интенсивность главных максимумов возрастает¹ в N^2 раз, и они становятся резкими и разделенными широкими промежутками, в которых интенсивность вторичных максимумов можно считать равной нулю. С увеличением порядка m главного дифракционного максимума интенсивность I_m соответствующего главного максимума уменьшается как $1/m^2$. С другой стороны интенсивность в m -м максимуме существенно зависит от отношения d/b . При совпадении условий возникновения главного максимума дифракционной картины на N щелях и минимума дифракции на отдельной щели исчезает каждый m -ый максимум равный отношению d/b . При $d/b=3$ выпадает каждый третий максимум в дифракционной картине (см. рис.1.1б). Оба эти недостатка устраняются применением фазовых решеток с профилированным штрихом, с помощью которых, подбирая профиль борозды можно перераспределить интенсивность с нулевого порядка на другие порядки. В нулевом порядке положения всех спектральных линий совпадают, а во всех других свет разложится в спектр. Основными характеристиками дифракционных решеток как спектрального прибора являются дисперсия (угловая $d\varphi/d\lambda$ или

¹ См. приложение

линейная $d/d\lambda$), ее разрешающая способность $\lambda/\delta\lambda$ и область дисперсии $\Delta\lambda = \lambda/m$, которая определяет интервал длин волн свободный от перекрытия соседних порядков и мала на более высоких порядках, где больше угловая дисперсия дифракционной решетки и разрешающая способность (разрешающая сила).

Из условия возникновения главных максимумов можно оценить угловую дисперсию D_m дифракционной решетки. Дифференцируя выражение (1.1), получим: $d \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi = m \cdot d\lambda$, или

$$D_m = d\varphi/d\lambda = m/(d \cdot \cos\varphi) \approx m/d, \quad (1.4)$$

так как для малых углов дифракции $\cos\varphi \approx 1$.

Дисперсия D_m дифракционной решетки тем больше, чем меньше d – расстояние между двумя соседними штрихами. Иными словами, чем больше штрихов на единицу длины дифракционной решетки, тем больше угол, на который разводятся два близких по длине волны максимума излучения в данном порядке. Следовательно, для увеличения дисперсии нужно чаще наносить штрихи. В настоящее время изготавливаются решетки с очень большим числом штрихов на единицу длины (до 3600 штрихов на 1 мм), а голографические решетки имеют число штрихов до 6000 на 1 мм.

Однако, для отдельного наблюдения двух близких по длине волны спектральных линий, необходимо, чтобы они были достаточно узки и разрешены, для чего надо использовать дифракционные решетки большой разрешающей силы. Оценим разрешающую силу $R = \lambda/\delta\lambda$ дифракционной решетки, пользуясь критерием Рэлея. Две линии, считаются разрешенными по данному критерию, если максимум одной линии совпадает с минимумом другой. Из условия $d \cdot \sin\varphi_{max} = m\lambda_1$ главного максимума для длины волны λ_1 , и условия $d \cdot \sin\varphi_{min} = m\lambda_2 + \lambda_2/N$ возникновения первого дополнительного минимума для λ_2 , полагая $\varphi_{max} = \varphi_{min}$, имеем:

$$\lambda_2/(\lambda_1 - \lambda_2) \approx \lambda/\delta\lambda = R = m \cdot N, \quad (1.5)$$

где λ – среднее от λ_1 и λ_2 значение длины волны, $\delta\lambda$ – их разность.

Разрешающая сила R дифракционной решетки зависит от общего числа штрихов, то есть от числа интерферирующих пучков. Многолучевая интерференция приводит к концентрации излучения в главных максимумах и к увеличению темных промежутков между ними, то есть к увеличению разрешающей силы, что и следует из выражения (1.5). Таким образом, чем больше штрихов на единицу длины дифракционной решетки, тем больше ее дисперсия, а чем

больше общее число штрихов, тем резче линии, то есть больше разрешающая сила.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема наблюдения дифракционной картины приведена на рисунке 2.1. Свет от ртутной (или водородной) лампы параллельным пучком падает на узкую щель и далее на дифракционную решетку с постоянной решетки $d = 0,01$ мм.

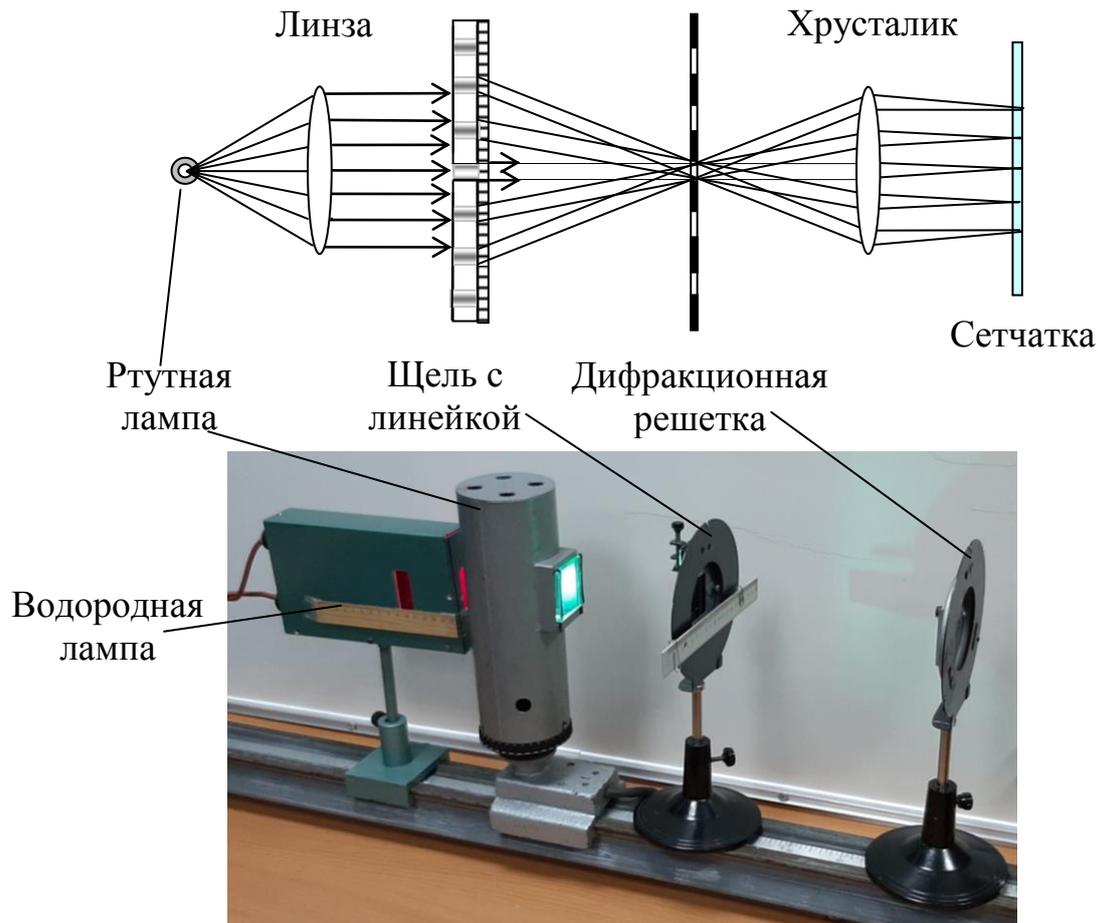


Рисунок 2.1 – Схема наблюдения дифракционной картины и внешний вид установки

Для водородной лампы, с узким светящимся капилляром, щель можно не использовать, так как ширина дифракционной решетки мала, и падающие на нее лучи можно считать почти параллельными. Мнимое изображение дифракционной картины наблюдается сквозь дифракционную решетку над миллиметровой линейкой, которая снабжена бегунком для определения положения спектральных линий в разных дифракционных порядках. В качестве линзы, собирающей лучи,

отклоненные под некоторым углом дифракции φ , выступает хрусталик, а в качестве экрана – сетчатка, где фиксируется действительное изображение дифракционной картины.

В плоскости щели наблюдаются несколько порядков (вплоть до шестого порядка и выше) мнимой дифракционной картины в виде разноцветных изображений узкой щели, соответствующих цветам трех основных наиболее интенсивных спектральных линий в спектре ртути (синей, зеленой и желтой) или двух линий в спектре атома водорода (голубой H_β и красной H_α). Чем уже щель, тем выше четкость наблюдаемых линий. В соответствии с условиями максимумов (1.1) для дифракционной решетки центральный максимум для всех длин волн совпадает, поэтому центральный максимум имеет цвет свечения источника света (ртутной лампы или водородной), что определяется цветами наиболее интенсивных спектральных линий. Только при освещении решетки естественным светом центральный максимум будет чисто белым. По обе стороны от центрального максимума располагаются дифракционные максимумы первого, второго и более высшего порядков, в которых разные длины волн не совпадают, а расстояния между линиями в пределах данного порядка увеличиваются с увеличением порядка m дифракционной картины. Следовательно, каждый порядок представляет собой полный (в пределах пропускания оптического канала) спектр² испускаемого источником излучения. В каждом порядке ближе к центральному максимуму располагаются наиболее короткие длины волн (синяя линия в спектре ртути). Так как положение дифракционных максимумов для данной решетки задается произведением $m \cdot \lambda$, то линии с некоторыми длинами волн в разных порядках могут совпасть. Для спектра ртути совпадает желтая линия третьего порядка с синей линией четвертого порядка (и вместо них наблюдается линия розового цвета), одна из зеленых линий четвертого порядка накладывается с синей линией пятого порядка и так далее.

3 ЗАДАНИЯ

3.1 Построить графики зависимости $\sin \varphi_{mi}$ от m/d для трех линий ртути или двух линий водорода H_α и H_β по указанию преподавателя.

3.2 Из графиков найти длины волн, как угловые коэффициенты полученных прямых. Сравнить с табличными значениями.

² См. приложение

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1 Установить ртутную лампу (с защитной стеклянной пластиной, задерживающей ультрафиолетовые лучи) соосно с вертикальной щелью и дифракционной решеткой. Решетку поместить на расстоянии $L = 30$ см от щели, ориентируя ее плоскость перпендикулярно направлению светового луча.

4.2 Наблюдая дифракционную картину сквозь решетку получить интенсивную и четкую картину регулировкой ширины щели и взаимного расположения щели и решетки по высоте. Изменяя наклон щели, обеспечить вертикальность наблюдаемых линий. Совместить нулевое деление шкалы с центральным максимумом.

4.3 По шкале линейки в пяти порядках измерить расстояния $x_m(\lambda_i)$ от центрального максимума до соответствующих линий ртути λ_i в каком-либо m -ом порядке. Результаты записать в таблицу 4.1.

4.4 Установить водородную лампу на расстоянии 30 см от дифракционной решетки и измерить расстояния $x_m(H_\alpha)$ и $x_m(H_\beta)$ от центрального максимума до красной и голубой линий спектра водорода в пяти порядках. Результаты записать в таблицу 4.1.

4.5 Вычислить значения $x_m(\lambda_i)/L = \operatorname{tg}\varphi_{mi} \approx \sin\varphi_{mi} \approx \varphi_{mi}$ и занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Положения спектральных линий от центрального максимума в разных порядках для ртутных и водородных $H_{\alpha,\beta}$ линий

m	$x_m(\lambda_c),$ мм	φ_{mc}	$x_m(\lambda_3),$ мм	φ_{m3}	$x_m(\lambda_ж),$ мм	$\varphi_{mж}$	$x_m(H_\alpha),$ мм	$\varphi_{m\alpha}$	$x_m(H_\beta),$ мм	$\varphi_{m\beta}$	$m/d,$ мм ⁻¹
1											
2											
3											
4											
5											

4.7 Оценить разрешающую силу R дифракционной решетки $R = \lambda/\delta\lambda = mN = ml/d$ ($l = 10$ мм – рабочая область дифракционной решетки) во втором порядке. Оценить в каком порядке разрешается желтый дуплет ($\delta\lambda = 2,1$ нм) в спектре ртути данной решеткой. Сравнить с экспериментально наблюдаемым спектром.

4.8 Учитывая, что $x_m(\lambda_i)/L = \operatorname{tg}\varphi_{mi} \approx \sin\varphi_{mi} \approx \varphi_{mi}$ построить графики зависимости $\sin\varphi_{mi}$ от m/d для всех трех линий ртути или двух линий

водорода H_{α} (красной) и H_{β} (голубой) пользуясь данными таблицы 4.1. Найти длины волн как угловые коэффициенты полученных прямых. По одной из графиков определить λ и ее погрешность, используя метод наименьших квадратов. Значения длин волн сравнить с табличными данными.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1 Что называется дифракцией света?

5.2 Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.

5.3 Каковы условия возникновения главных максимумов и минимумов дифракционной картины при дифракции от решетки и от одной щели?

5.4 Что называется периодом или постоянной d решетки?

5.5 Как меняется вид дифракционной картины при изменении постоянной решетки, ее размера или общего числа штрихов N , отношения d/b ?

5.6 Как меняется вид дифракционной картины при облучении решетки источником света с линейчатым спектром, белым светом, источником монохроматического света?

5.7 Что такое угловая дисперсия дифракционной решетки, и от каких параметров решетки она зависит?

5.8 Что такое разрешающая способность дифракционной решетки и как она связана с параметрами решетки?

5.9 Короткие длины волн или длинные отклоняются дифракционной решеткой на большие углы?

5.12 Почему происходит перекрытие спектров некоторых соседних порядков?

5.13 Как зависит интенсивность главных максимумов от порядка максимума m и от общего числа щелей N ?

5.14 Для чего применяются решетки с профилированным штрихом?

6 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

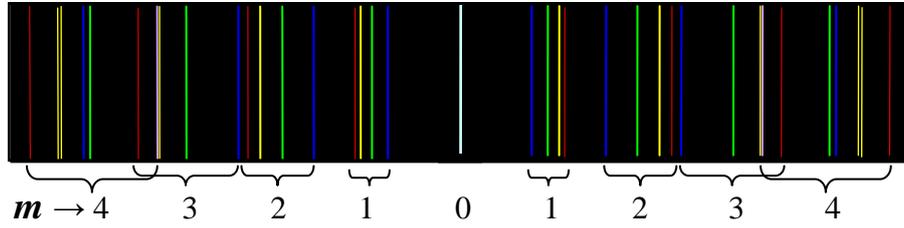
6.1 Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. -М.: Высшая школа, 2000. -718 с.

6.2 Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. -М.: Высшая школа, 1998. -С. 391-398.

6.3 Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн. 4.: Волны, Оптика: учеб. пособие для втузов. М.: АСТ: Астрель, 2006. -256 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Дифракционный спектр ртути при большом числе щелей:



Интенсивность в главных максимумах дифракционной решетки дается выражением:

$$I_m = I_0 \left(\frac{N \cdot d}{\pi m b} \right)^2 \cdot \sin^2(\pi m b / d)$$