НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



ФЯЛ-03

УМК «ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ВЕРСИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С ПК.

Тула, 2016 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. УЧЕБНО МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС «ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ» АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ВЕРСИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С ПК.

Цель работы: знакомство с волнами де Бройля, наблюдение дифракции электронов на монокристаллическом образце никеля и подтверждение волновой природы электронов.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ. Корпускулярно-волновой дуализм вещества.

До 20-ых годов XX века просуществовал взгляд на природу частиц и волн как на категории, имеющие принципиальное различие.

Классическая частица – это комочек материи чаще всего – материальная точка, имеющая массу m, размер $\Delta \zeta \Rightarrow 0$, импульс p=mv, причем, зная сумму сил, действующих на частицу ΣF , можно, используя классический принцип причинности, определить траекторию и положение на ней частицы в любой момент времени.

Волна – объект, занимающий в пространстве конечный, зачастую очень большой объем, любой волне свойствен импульс $p = h/\lambda$, который при $\lambda =$ const (монохроматическая волна) строго определен. Волны в случае их когерентности могут интерферировать, а частицы к этому в принципе неспособны.

Однако в 1900 году Планком, а в 1923 году для вещества Луи де Бройлем был открыт фундаментальный закон природы – корпускулярно-волновой дуализм или дуализм волн и частиц.

Французский ученый Луи де Бройль (1892—1987), осознавая существующую в природе симметрию и развивая представления о двойственной корпускулярно-волновой природе света, выдвинул в 1923 г. гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Де Бройль утверждал, что не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами.

Итак, согласно де Бройлю, с каждым микрообъектом связываются, с одной стороны, корпускулярные характеристики - энергия (кинетическая) E_k и импульс р, а с другой — волновые характеристики — частота v и длина волны λ . Количественные соотношения, связывающие корпускулярные и волновые свойства частиц, такие же, как для фотонов:

$$p = \frac{h}{\lambda}, \ E_k = h \cdot \nu \tag{1.1}$$

Смелость гипотезы де Бройля заключалась именно в том, что соотношение (1.1) постулировалось не только для фотонов, но и для других микрочастиц, в частности для таких, которые обладают массой покоя. А дерзость состояла в том, что никаких экспериментальных фактов в подтверждение гипотезы не было. Таким образом, любой частице, обладающей импульсом, сопоставляют волновой процесс с длиной волны, определяемой по формуле де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \tag{1.2}$$

Это соотношение справедливо для любой частицы с импульсом *p*.

Интересно отметить, что представления о волнах де Бройля позволили получить логически самый противоречивый 1-ый постулат Бора.

Естественно предположить, что электрон может бесконечно долго двигаться лишь по траектории, на длине которой укладывается целое число волн де Бройля, образуя стоячую волну, которая как известно, энергии не переносит:

$$2\pi r_n = n\lambda$$

где $\lambda = \frac{h}{mv}$, λ - длина волны де Бройля для электрона, v – его скорость, а m – масса.

Но тогда $2\pi r_n = n \frac{h}{mv_n} \Longrightarrow mv_n r_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar.$

Здесь учтено, что в нерелятивистском случае импульс электрона определяется выражением p=mv.

Хотя в своих ранних работах Л. де Бройль рассматривал электроны, формула (1.2) справедлива для любых материальных тел. Почему же мы не наблюдаем их для макроскопических объектов, например, для летящей хоккейной шайбы? Рассчитаем соответствующую длину волны де Бройля. Хоккейная шайба, пущенная сильным ударом, имеет скорость около 40 м/с, масса ее 0,2 кг, откуда длина волны де Бройля по формуле (1.2) $\lambda = 8,25 \cdot 10^{-35}$ м. Волновые свойства шайбы не проявляются просто потому, что их невозможно зарегистрировать. Вычисленная длина волны намного меньше не только размеров атома (диаметр атома порядка 10^{-10} м), но и размеров атомного ядра (учитывая, что диаметр ядра порядка 10^{-15} м)!

Электроны, движущиеся в ускоряющей разности потенциалов.

Заметим, что движущийся с такой же скоростью (около 40 м/с) электрон будет иметь длину волны $\lambda = 1,8 \cdot 10^{-5}$ м, которая уже может быть легко обнаружена и измерена экспериментально. Для условно «медленных» электронов, ускоренных разностью потенциалов 100 – 10000 В, для тепловых нейтронов, для молекул водорода при комнатной температуре и других "медленных" микрочастиц длины волн де Бройля такого же порядка, что и длины волн мягких рентгеновских лучей. Поэтому волновые свойства таких частиц можно наблюдать, например, с помощью дифракции, аналогично дифракции рентгеновских лучей.

Движение электрона, или какой-либо другой частицы, связано с волновым процессом, как было сказано выше. Длина волны этого процесса определяется формулой (1.2), которую часто записывают в виде (нерелятивистский случай):

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi\hbar}{m\nu} \tag{1.3}$$

Если частица имеет кинетическую энергию $E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$, то ей соответствует длина волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2E_k \cdot m}} \tag{1.4}$$

Для электрона, ускоряемого разностью потенциалов ΔU , кинетическая энергия $E_k = \frac{mv^2}{2} = e \cdot \Delta U$, тогда получаем:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2\,me}\cdot\Delta\,U} \approx \frac{12,25}{\sqrt{\Delta\,U}} \quad [Ангстрем] \tag{1.5}$$

Найдем теперь выражение для волны де Бройля для «быстрых частиц», с учетом релятивистских поправок.

Полная энергия и импульс частицы зависят от системы отсчета. Масса не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Она является лоренцевым инвариантом. Полная энергия импульс и масса связаны известным соотношением:

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 \tag{1.6}$$

Кинетическая энергия частицы равна, где mc² – энергия покоя:

$$E_k = E - mc^2 \rightarrow E = E_k + mc^2 \tag{1.7}$$

Исходя из (1.6) импульс релятивистской частицы:

$$p^{2} = \frac{E^{2} - m^{2}c^{4}}{c^{2}}$$
(1.8)

Либо, из соотношения (1.7), т. к. по определению полная энергия равна $E = E_k + mc^2$, получим:

$$p = \frac{\sqrt{E_k^2 + 2E_k mc^2}}{c} \tag{1.9}$$

Для электрона, ускоряемого разностью потенциалов ΔU, кинетическая энергия по прежнему определяется известным выражением:

$$E_k = e \cdot \Delta U \tag{1.10}$$

Подставляя выражение для импульса *p* (1.9) с учетом (1.10) в (1.2) путем несложных преобразования получим:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 e \Delta U m \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{e \Delta U}{mc^2} + 1\right)}}$$
(1.11)

Воспользовавшись формулой приближенных вычислений $\sqrt[n]{x_0 + \Delta x} = (x_0 + \Delta x)^{\frac{1}{n}} = x_0^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{n} \cdot x_0^{\frac{1}{n}-1} \cdot \Delta x$, получим:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \, me \,\Delta \, U}} \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{e \,\Delta \, U}{mc^2}\right) \tag{1.13}$$

При ускоряющем напряжении $\Delta U \approx 10$ кВ поправка в скобках $\delta \lambda = \frac{1}{4} \cdot \frac{e \Delta U}{mc^2}$ составляет величину $\delta \lambda \approx 0.5$ %, и ею можно пренебречь, рассчи-

тывая длину волны по «классической» формуле, не учитывающей релятивистских поправок (1.5).

Экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля. Опыт Дэвиссона и Джермера.

Впервые гипотеза де Бройля была подтверждена экспериментально в опытах по дифракции электронов американскими физиками К. Дэвиссоном (C.Devisson) и Л. Джермером (L. Germer).

Опыты Дэвиссона и Джермера могут быть проведены по двум схемам, исследующим рассеяние на поверхности кристалла, когда пучок электронов падает на срез кристалла (пластинку) нормально и по схеме трёхмерной дифракции, которую обычно рассматривают как отражение первичного пучка электронов от системы параллельных атомных плоскостей в объеме кристалл.

Если пучок электронов обладает волновыми свойствами, то можно ожидать, даже не зная механизма отражения этих волн, что их отражение от кристалла будет иметь такой же интерференционный характер, как у рентгеновских лучей.



Рис. 2.1. Схема первого опыта Дэвиссона и Джермера: *К* монокристалл никеля (пластина, срез); Э - электронная пушка; Ф цилиндр Фарадея (детектор электронов).

Рассмотрим первую серию опытов, т. е. дифракцию электронов на поверхности кристалла рис. 2.1.

Для электронов с энергией от десятков до сотен эВ λ того же порядка, что и длина волны рентизлучения, такие электроны геновского наз. медленными. Электронам с энергией в несколько десятков кэВ соответствуют длины волн у-излучения (десятые доли нм). Электроны таких (и выше) энергий наз. быстрыми. Электронам с энергией 30 — 1000 эВ соответствуют значения λ порядка размеров атомов или межатомных расстояний в кристаллах. Такие медленные электроны с энергией ~ 100 эВ и использовали Дэвиссон и Джермер в своих экспериментах. Тонкий пучок электронов падал на грань (111) монокристалла никеля нормально к её поверхности (рис. 1). Распределение рассеянных электронов регистрировалось в опыте под разными углами θ с помощью гальванометра, подключённого к цилиндру Фарадея (в современном исполнении чувствительный приемник электронов).

В этой серии опытов Дэвиссона и Джермера для обнаружения дифракционных максимумов (если таковые есть) изменялось ускоряющее напряжение электронов и одновременно положе-



Рис. 2.2. Грань {111} куба



Рис. 2.3. Схема первой серии опытов Дэвиссона и Джермера d=0,215 нм

ние детектора *D* (счетчика отраженных электронов). В опыте использовался монокристалл никеля (кубической системы), сошлифованный так, как показано на рис.2.1.



Рис. 2.4. Полярные диаграммы для различных значений ускоряющего напряжения ΔU, определяющие интенсивность рассеянных электронов от угла рассеяния θ. При ΔU= 44 В (рис.2.4 а) дифракционный максимум под углом θ= 50⁰ только начинает формироваться, при ΔU= 54 В (рис.2.4 в) он достигает максимальной интенсивности, а при дальнейшем возрастании ΔU (рис.2.4 г, д) опять ослабляется вплоть до полного исчезновения.

Если кристалл повернуть вокруг вертикальной оси в положение, соответствующее рисунку, то в этом положении сошлифованная поверхность покрыта правильными рядами атомов, перпендикулярными к плоскости падения (плоскости рисунка), расстояние между которыми d=0,215 нм.

Детектор перемещали в плоскости падения, меняя угол θ . При угле $\theta = 50^{\circ}$ и ускоряющем напряжении *U*~54В наблюдался особенно отчётливый максимум отраженных электронов, полярная диаграмма которого показана на рис.2.4 в).

Этот максимум можно истолковать как интерференционный максимум первого порядка от плоской дифракционной решетки с периодом d:

$$d\sin(\theta) = \lambda \tag{2.1}$$

Это видно на рис. 2.3. На этом рисунке каждая жирная точка представляет собой проекцию цепочки атомов, расположенных на прямой, перпендикулярной плоскости рисунка. Период *d* может быть измерен независимо, например, по дифракции рентгеновских лучей.

Вычисленная по формуле (1.5) де Бройлевская длина волны для U=54B равна 0,167 нм. Соответствующая же длина волны, найденная из формулы (2.1), равна 0,165 нм. Совпадение настолько хорошее, что полученный результат следует признать убедительным подтверждением гипотезы де Бройля.

Рассмотрим вторую серию опытов, т. е. дифракцию электронов в объёме кристалла.

Другая серия опытов Дэвиссона и Джермера состояла в измерении интенсивности I отраженного электронного пучка при заданном угле падения, отличном от 90°, т. е. электронный пучок падает на образец под некоторым углом, в отличии от первой серии опытов, когда пучок падал на кристалл нормально. При этом также устанавливались различные значения ускоряющего напряжения ΔU .

Теоретически должны появиться при этом интерференционные максимумы отражения подобно отражению рентгеновских лучей от кристалла. От различных кристаллических плоскостей кристалла в результате дифракции падающего



излучения на атомах исходят волны, как бы испытавшие зеркальное отражение от этих плоскостей. Данные волны при интерференции усиливают друг друга, если выполняется условие Брэгга-Вульфа:



Рис. 2.5. Схема трёхмерной дифракции

Электроны с дебройлевской длиной волны λ_{δ} могут дифрагировать на различных атомных плоскостях (рис.2.5а), выбор которых осуществляется взаимной ориентацией падающего пучка электронов и рассеивающего кристалла. Пусть электроны падают на кристалл под углом скольжения а по отношению к рассеивающему семейству плоскостей (см. рис. 2.5). Для простоты рассмотрим симметричный случай (рис.2.1б), когда поверхность кристалла С параллельна рассеивающим плоскостям, хотя на практике это условие далеко не всегда выполняется. Тогда угол α будет углом скольжения, под которым электроны падают на поверхность кристалла, а угол $\beta = \pi - 2\alpha$ - углом между падающим и дифрагировавшим пучками электронов.

Как было сказано выше, при значении угла α, удовлетворяющем условию Брэгга-Вульфа (2.2) возникает интенсивный дифракционный максимум отраженной волны:

$$2d\sin\alpha_{E} = n\lambda_{E}, \ n=1, 2, 3, \dots$$
 (2.3)

Здесь $\alpha_{\rm b}$ - брэгговский угол, $\lambda_{\rm b}$ — длина волны де Бройля, d - расстояние между отражающими плоскостями (постоянная решетки кристалла), n - целое число, принимающее значения 1, 2, 3, ..., называемое порядком отражения.

Физический смысл условия Брэгга-Вульфа (2.3) достаточно прозрачен: дифракционный максимум появляется в тех случаях, когда разность хода волн, отраженных от соседних атомных плоскостей, равна целому числу длин волн де Брой-



Рис. 2.6. К выводу формулы Вульфа-Брэгга d=0,203 нм

ля. Именно в этом случае отраженные волны усиливают друг друга, т.е. имеет место конструктивная интерференция.

Напомним вывод этой формулы (рис. 2.6).

Из рис. 2.6 видно, что разность хода двух волн, 1 и 2, отразившихся зеркально от соседних атомных слоев, $ABC=\Delta=2\cdot d\cdot \sin(\alpha)$. Следовательно, направления, в которых возникают интерференционные максимумы, определяются условием (2.3), т. е. разность хода должна быть равна целому числу длин волн де Бройля.

Теперь подставим в формулу (2.3) выражение (2.1) для нерелятивистской дебройлевской длины волны. Поскольку значения α и *d* экспериментаторы оставляли неизменными, то из формулы (2.3) следует, что:

$$\sqrt{\Delta U} = \frac{nh}{2\,d\sin(\alpha)\cdot\sqrt{2\,em}} = B\,n \tag{2.4}$$

т.е. значения $\sqrt{\Delta U}$, при которых образуются максимумы отражения, должны быть пропорциональны целым числам n = 1, 2, 3, ..., другими словами, находиться на одинаковых расстояниях друг от друга.

Это и было проверено на опыте, результаты которого представлены на рис. 2.7, где U представлено в вольтах $I = I(\sqrt{U})$. Видно, что максимумы интенсивности I почти равноудалены друг от друга (такая же картина возникает и при дифракции рентгеновских лучей от кристаллов).



Рис. 2.7. Результаты опытов Дэвиссона и Джермера

Полученные Дэвиссоном и Джермером результаты весьма убедительно подтверждают гипотезу де Бройля. В теоретическом отношении, как мы видели, анализ дифракции дебройлевских волн полностью совпадает с дифракцией рентгеновского излучения.

Итак, характер зависимости (2.4) экспериментально подтвердился, однако наблюдалось некоторое расхождение с предсказаниями теории. А именно, между положениями экспериментальных и теоретических максимумов (последние показаны стрелками на рис. 2.7) наблюдается систематическое расхождение, которое уменьшается с увеличением ускоряющего напряжения *U*. Это расхождение, как выяснилось в дальнейшем, обусловлено тем, что при выводе формулы Брэгга-Вульфа не было учтено преломление дебройлевских волн.

Формула Вульфа-Брэгга с учетом преломления волн в кристалле.

Показатель преломления *n*^{*} дебройлевских волн, как и электромагнитных, определяется формулой:

$$n^* = \frac{v_B}{v_C} \tag{3.1}$$

где υ_B — фазовая скорость волны де Бройля в вакууме, υ_C — фазовая скорость волны де Бройля в среде (кристалле).

Фазовая скорость дебройлевской волны — принципиально ненаблюдаемая величина. Поэтому формулу (3.1) следует преобразовать так, чтобы показатель преломления *n*^{*} можно было выразить через отношение измеряемых величин. Это можно сделать следующим образом. По определению, фазовая скорость:

$$\psi = \frac{\omega}{k} \tag{3.2}$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число. Считая аналогично фотонам, что частота и дебройлевских волн тоже не меняется при переходе границы раздела сред (если такое предположение несправедниво, то опыт неизбежно укажет на это), пред-

такое предположение несправедливо, то опыт неизбежно укажет на это), представим (3.1) с учетом (3.2) в виде:

$$n^* = \frac{k_C}{k_B} = \frac{\lambda_{BB}}{\lambda_{BC}}$$
(3.3)

$$E_{k} = eU = e(U+U_{0})$$

Рис. 2.8. Потенциальная яма в кристалле. Ускоряющая разность потенциалов здесь обозначена как U≡∆U

Попадая из вакуума в кристалл (металл), электроны оказываются в потенциальной яме. Здесь их кинетическая энергия E_{κ} возрастает на «глубину» потенциальной ямы eU₀ (рис. 2.8). Из формулы (1.5), где $E_k = \Delta U e$, следует, что

 $\lambda \sim \frac{1}{\sqrt{\Delta U}}$ Поэтому выражение (3.3) можно переписать так:

$$n^* = \frac{\sqrt{\Delta U + U_0}}{\sqrt{\Delta U}} = \sqrt{1 + \frac{U_0}{\Delta U}}$$
(3.4)

где U_0 — внутренний потенциал кристалла. Видно, что чем больше ΔU (относительно U₀), тем *n** ближе к единице. Таким образом, *n** проявляет себя особенно при малых ΔU .



Рис. 2.8. К выводу условия Вульфа-Брэгга с учетом преломления в кристалле.

Дальнейший вывод «оптической» разности хода $\Delta = \Delta_{\Gamma} \cdot n^*$, где Δ_{Γ} - геометрическая разность хода, точно такой же, как при выводе формулы Вульфа - Брэгга) на основании рис. 2.8; надо лишь учесть преломление электронных волн. При этом под Δ следует понимать «оптическую» разность хода.

Рассмотрим два интерферирующих луча 1 и 2 рис. 2.8. Вследствие преломления внутренний угол скольжения φ' не равен внешнему φ. Разность хода Δ_г (геометрическая) лучей 1 и 2, очевидно, равна:

$$2d\sin\varphi' = 2d\sqrt{1-\cos^2\varphi'} \tag{3.5}$$

Оптическая разность хода $\Delta = \Delta_{\Gamma} \cdot n^*$ равна соответственно: $\Delta = 2 d \sqrt{1 - \cos^2 \varphi'} \cdot n^*$ (3.6)



Рис. 2.9. Интерференция двух лучей в кристалле

Согласно определения показателя преломления (закон Снеллиуса, рис. 2.9):

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = n^*$$
(3.7)

Отражение лучей 1 и 2 происходит внутри кристалла от параллельных атомных плоскостей, поэтому дополнительная разность хода в виде потери полуволны $\frac{\lambda}{2}$ компенсируется. Это видно например из рис. 2.8. Здесь отражение луча 2 от первой атомной плоскости (атома кристаллической решетки) даёт потерю полуволны $\frac{\lambda}{2}$, но такую же потерю полуволны испытывает и луч 1, который после преломления (которое, как известно, не вносит вклад в разность фаз) отражается от нижней атомной плоскости (от нижнего атома решетки).

С помощью несложных геометрических построений из рис. 2.9 следует, что:

$$\alpha = 90^{\circ} - \varphi$$

$$\beta = 90^{\circ} - \varphi'$$

Тогда показатель преломления:

$$\frac{\sin(90^{\circ}-\varphi)}{\sin(90^{\circ}-\varphi')} = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi'} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = n^*$$
(3.8)

Из (3.6) следует, что:

$$\Delta = 2 d \sqrt{1 - \cos^2 \varphi'} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'} = 2 d \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi'}} - \cos^2 \varphi = 2 d \sqrt{(n^*)^2 - \cos^2 \varphi} \quad (3.9)$$

Условие максимума интерференции теперь будет:

$$\Delta = 2 d \cdot \sqrt{(n^*)^2 - \cos^2 \varphi} = n\lambda \qquad (3.10)$$

где d – межплоскостное расстояние при данной ориентации образца, φ — угол скольжения, $n^* = \sqrt{1 + \frac{U_0}{\Delta U}}$ - показатель преломления, U_0 – внутренний потенциал образца, n – порядок дифракции. Полученные экспериментально значения внутреннего потенциала U_0 для некоторых металлов, приведены в таблице 1. Как видно, эти значения достаточно постоянны. Они согласуются со значениями, вычисленными из теории металлов. Важную роль в истолковании связи между внутренним потенциалом металла и преломлением электронных волн сыграли работы советского физика В. Е. Лашкарева.

Металл	Ускоряющий потекциал (в вольтах)	λвÅ	n	n*	V ₀ (вольт)	
Ni	67	1,49	3	1,12	17	
	142	1,03	4 5	1,95 1.03	16 1 M	
\mathbf{p}_{b}	65	1,52	3	1,10	14	
	125	1,09.	1	1,06	15	
A ~	208	0,84	5	1,03	13	
чŖ	96	1.25	0 4	1,10	10	
	166	0,95	ธิ	1,04	13	

Таблица 1

Убедимся, что формула Брэгга-Вульфа (3.10) с учетом преломления действительно объясняет положения максимумов интенсивности $I = I(\sqrt{\Delta U})$ на рис. 2.7. Заменим в (3.10) n^* и λ согласно формулам (3.4) и (1.5) их выражениями через ускоряющую разность потенциалов ΔU . Также из (1.5) запишем длину волны де Бройля в [нм] $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2me\cdot\Delta U}} \approx \frac{1,225}{\sqrt{\Delta U}}$ [Нм], где ΔU в [Вольтах]. $\sqrt{\frac{U_0}{\Delta U} + \sin^2 \varphi} = \frac{n}{2d} \cdot \frac{1,225}{\sqrt{\Delta U}}$ (3.11)

Распределение $I = I(\sqrt{\Delta U})$ на рис.2.7 получено для никеля при значениях $U_0=15$ В, d=0,203 нм и $\varphi=80^\circ$. Тогда (3.11) после несложных преобразований можно переписать так:

$$\sqrt{\Delta U} = \frac{\sqrt{9.1 n^2 - U_0}}{\sin \varphi} \tag{3.12}$$

Вычислим по этой формуле значение $\sqrt{\Delta U}$, например, для максимума третьего порядка (n = 3), для которого расхождение с формулой Брэгга-Вульфа (2.3) оказалось наибольшим:

$$\sqrt{\Delta U} = \frac{\sqrt{9,1 \cdot 3^2 - 15}}{0,985} = 8,3 \text{ B}^{1/2}$$

Получили практически полное совпадение с действительным положением максимума 3-го порядка.

На рис. 2.10 приведены оригинальные результаты экспериментов второй серии опытов, полученные Дэвиссоном и Джермером из соответствующей статьи в научном журнале Davisson, С. J., "Are Electrons Waves?" Franklin Institute Journal 205, 597 (1928).



Рис. 2.10. Результаты опытов Дэвиссона и Джермера

В целом следует отметить, что получаемые результаты сильно зависят от условий эксперимента, состояния образца, ориентации кристалла, настройки «электронной пушки» и других факторов.

Зависимость тока в приборе Дэвиссона-Джермера от энергии электронов для первой серии экспериментов по поверхностной дифракции электронов приведена на рис. 2.11 для угла рассеяния $\theta = 50^0$



Рис. 2.11. Зависимость тока в приборе Дэвиссона-Джермера от энергии электронов для первой серии экспериментов по поверхностной дифракции электронов (схема рис. 2.3) приведена для угла рассеяния $\theta = 50^0$

Дифракция электронов на пропускающей дифракционной решетке.



Рис. 3.1. Пропускающая дифракционная решетка. Линза нужна при работе в видимом диапазоне длин волн для наблюдения дифракционной картины на экране.

Как было сказано выше, с волновой точки зрения дифракция электронов полностью эквивалентна дифракции света на дифракционной решётке. Поэтому при рассеянии электронов пропускающей дифракционной решеткой рис. 3.1 положение главных максимумов определяется формулой дифракционной решётки, аналогично схеме рис. 2.3 для поверхностной дифракции на кристалле, где роль щелей решетки играют межатомные расстояния:

$$d\sin\Theta = m\lambda. \tag{4.1}$$

где, Θ — угол рассеяния (дифракции) m – порядок дифракции, d – период решетки, λ — длина волны де Бройля для электрона с данной кинетической энергией.

При малых углах дифракции $sin(\Theta) \approx \Theta$, тогда:

$$\Theta \approx \frac{m\lambda}{d} \,. \tag{4.2}$$

Если на некотором расстоянии L от решётки поместить фотопластинку либо ПЗС линейку с набором датчиков, то на ней будет зарегистрирована дифракционная картина в виде узких дифракционных полос – рефлексов, положения которых определяются при малых углах дифракции соотношением

$$x_m \approx L\Theta \approx \frac{mL\lambda}{d},$$
 (4.3)

где x_m – расстояние от дифракционного максимума нулевого порядка с m=0 до максимума m-ого порядка.

Откуда период кристаллической решётки (межплоскостное расстояние):

$$d \approx \frac{mL\lambda}{x_m}.$$
 (4.4)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. Аппаратная часть.

Учебный Моделирующий Комплекс (УМК) – это действующая модель сложной экспериментальной (научной) установки. В ней отсутствует радиоактивный источник излучения, а все результаты эксперимента содержатся в базе данных микропроцессора, полученной из экспериментов на научных установках. В предлагаемой лабораторной работе изучается дифракция электронов на примере опытов Дэвиссона и Джермера, реализуемая в двух вариантах.

В первом эксперименте исследуется дифракция электронов на поверхности образца (тонкой пленки пластины никеля, ориентированной нормально падающему пучку согласно схеме рис. 2.3). В данном случае слои атомов фактически играют роль отражающей дифракционной решетки.

Во втором эксперименте изучается объёмная дифракция на примере того же образца (пластины никеля), но в данном случае образец ориентирован под углом скольжения 80° относительно падающему пучку согласно схеме экспериментов рис. 2,5; 2.6.

При этом в первом эксперименте образец ориентирован так, что межатомное расстояние согласно табличным данным равно d=0,215 нм. Во втором эксперименте образец относительно падающего пучка ориентирован плоскостями с d=0,203 нм.

В нашем приборе мишень остается неподвижной, вместо этого она облучается в каждом эксперименте различными «электронными пушками», расположенными согласно рассмотренным схемам экспериментов.

Экспериментальная установка для исследования представляет собой модель вакуумированной камеры, в которой находятся:

- 1. Две модели электронных пушек (красные лазерные светодиоды), ориентированные согласно первой и второй серии экспериментов в опытах Дэвиссона и Джермера;
- 2. Мишени из модели образца Ni;
- 3. Набора полупроводниковых детекторов электронов (моделей) с необходимой эффективностью;

В отличие от оригинальной научной установки, предлагаемый прибор «фиксирует» рассеянные частицы высокоэффективным полупроводниковым детектором и может работать с персональным компьютером.

На экран компьютера и на дисплей учебной установки выводятся все необходимые параметры (угол рассеяния, режим эксперимента, электронный ток через гальванометр и т. д.).

Третий эксперимент виртуальный и проводится с помощью среды лабораторного практикума LabVisual. Эксперимент в целом повторяет первую серию опытов Дэвиссона и Джермера с той лишь разницей, что проводится на прозрачной (пропускающей) дифракционной решетке (дифракция на щелях).

Приборы и оборудование.

Лабораторная работа по постановке серии экспериментов по дифракции электронов выполняется на УМК ФЯЛ-03 (рис. 4.1), имеющим сопряжение с ПК, но допускающим ручной (автономный) режим работы. Все параметры эксперимента, установленные и измеренные значения параметров выводятся в соответствующие окна программы - оболочки для работы с установкой – LabVisual 2.5/3/3.5 и дублируются на ЖКД LCD дисплее учебной установки. Лабораторный комплекс может работать как в сопряжении с ПК, так и в ручном режиме работы, для которого не требуется наличие компьютера.

Соединение прибора с ПЭВМ для версии LabVisual-3 осуществляется через LAN (Ethernet) порт ПК (через сетевую карту).

Учебная установка состоит из двух блоков: 1) ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ и 2) БЛОКА ДАТЧИКОВ С ОБРАЗЦОМ И ИСТОЧНИКАМИ (двумя моделями электронных пушек), соединяемых между собой специальным кабелем из комплекта. ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ может подключаться к ПЭВМ через LAN (Ethernet) порт ПК (через сетевую карту).

По радиусу на одинаковом расстоянии от «ОБРАЗЦА» (мишени из никеля) расположены модели чувствительных полупроводниковых детекторов. На их поверхности имеются светодиоды, фиксирующие «включение» того или иного датчика, что соответствует готовности к измерениям в соответствующем угле рассеяния.

Для первой серии экспериментов по поверхностной дифракции измерения можно проводить для углов рассеяния 10° — 80° (рекомендуемый диапазон для измерений 20° — 70°). При этом «активна» первая электронная пушка, электроны от которой падают нормально (под углом 90°) к поверхности образца.

Для второй серии экспериментов схема опыта воспроизведена с оригинальной установки Дэвиссона и Джермера рис. 2.10. При этом угол скольжения (α на рис. 2.6, φ на рис. 2.8, 2.9) равен 80° (а угол между нормалью от поверхности образца и падающим пучком соответственно 10°). Под таким же углом симметрично расположен датчик электронов.

При этом для первой и второй серии экспериментов сканирование осуществляется по длине волны λ падающих электронов (т. е. по их энергии), изменением ускоряющего потенциала ΔU анода электронной пушки.

Для первой серии экспериментов получается набор кривых, аналогичных рис. 2.11 с различными максимумами интенсивности электронного тока при некотором значении $\Delta U_{\text{макс}}$ ускоряющего напряжения анода для разных углов рассеяния θ . Полученные значения напряжения $\Delta U_{\text{макс}}$ или, что тоже самое, энергии электронного пучка (формула 1.4) или длины волны λ (формула 1.5) должны соответствовать формуле для дифракционной решетки (2.1).

Для второй серии экспериментов получается дифракционная картина, аналогичная рис. 2.7, 2.10. Отличие состоит в том, что данный прибор позволяет измерить также положение дифракционного максимума второго порядка n=2 (приближенно, на границе чувствительности по напряжению).



Рис. 4.1. Блок схема прибора УМК ФЯЛ-03.

На верхней панели прибора расположены: кнопка включения (СЕТЬ), LCD ЖКИ индикатор и набор кнопок управления установкой. На боковой панели расположен 25-PIN разъем для подключения БЛОКА ДАТЧИКОВ с помощью специального соединительного кабеля из комплекта. На передней панели имеется разъем LAN для соединения прибора с сетевой картой ПК.

Опционально, на задней панели БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ может быть расположен 9-PIN разъем для перепрограммирования прибора и кнопка для перепрограммирования (ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ ДОЛЖНА БЫТЬ ОТЖАТА), которые служат для инженерной отладки прибора во время настройки и не используются в работе.

Программная часть. Подготовка к работе.

Учебная установка может работать как в автономном (ручном) режиме, без использования ПК, так и в автоматизированном режиме с персональным компьютером.

Для сопряжения работы учебной установки с персональным компьютером используется специально разработанный протокол передачи данных LabVisual, разделяющий байты управления и байты данных. Для визуализации принятых данных служит программа-оболочка LabVisual для ФЯЛ-03. Установка подключается к LAN (Ethernet) порту ПК (сетевая карта) компьютера при помощи специального соединительного кабеля.

Программа LabVisual может успешно работать как на компьютерах под управлением OC Windows так и на компьютерах под управлением OC Linux (с соответствующим ПО). При этом достаточно установить драйвера используемой сетевой карты.

В комплекте с лабораторной установкой поставляется ПЭВМ с предустановленным дистрибутивом среды LabVisual 3 и установленным и настроенным программным обеспечением.

После загрузки программной среды (~ 1 мин.) автоматически запуститься программа оболочка LabVisual для работы с экспериментальной установкой. Если программа не запустилась автоматически, на рабочем столе следует дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на ярлык LabVisual. При этом должно открыться главное окно программы-оболочки LabVisual для работы с экспериментальной установкой (рис. 5.1).

Программа LabVisual имеет интуитивно понятный, дружественный пользователю интерфейс, однако при первом включении необходимо выполнить первичную настройку на стороне ПК.

Для установки соединения ПЭВМ с лабораторной установкой через порт LAN (сетевая карта ПК) необходимо предварительно выполнить процедуру настройки сетевой карты компьютера. IP адрес устройства (учебной установки) фиксирован **192.168.0.222**, поэтому для соединения ПК и учебного прибора через LAN необходимо зайти в настройки сетевой карты ПК: ПУСК-НАСТРОЙ-КА-ПАНЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ-СЕТЕВЫЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ, выбрать ПОД-КЛЮЧЕНИЕ ПО ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ, и, нажав правую кнопку мыши, войти в меню "СВОЙСТВА".

Выбрать "Протокол версии Интернета 4 ТСР/ІРv4 и нажать "СВОЙСТВА". В свойствах сетевого соединения установить:

1) Использовать следующий IP адрес: 192.168.0.2 (либо любой другой из подсети 192.168.0.xx)

2) Маска подсети 255.255.255.0

После предварительной настройки можно подключать прибор к LAN порту ПЭВМ.

Для проверки соединения включите прибор, настройте параметры сетевой карты, подключите прибор к LAN порту ПК и выполните на ПК команду ping 192.168.0.222.



Рис. 5.1. Главное окно программы-оболочки LabVisual для работы с экспериментальной установкой ФЯЛ-03.

В новых версиях программного обеспечения можно выполнить процедуру автонастройки сети, нажав на кнопку «АВТОНАСТРОЙКА LAN».

После соединения прибора с LAN – портом ПК следует запустить подпрограмму работы с прибором, нажав кнопку «РАБОТА С ПРОГРАММОЙ/РАБО-ТА С ПРИБОРОМ» в интерфейсе LabVisual, необходимая подпрограмма для измерения должна запуститься и автоматически начаться обмен информацией с ПК (измерение текущих параметров) рис. 5.2, 5.3.

Для ознакомления с программой в отсутствии учебной установки, можно воспользоваться демонстрационным режимом.

Также для работы доступны мультимедийные ресурсы (ЭКСПЕРИМЕНТ-3 ДИФРАКЦИЯ НА ЩЕЛЯХ), которые можно открыть, нажав кнопку «МУЛЬТИ-МЕДИА РЕСУРСЫ» либо открыть файл *.html в браузере с поддержкой FLASH и JAVA. Для работы java-апплетов необходимо установить среду JRE, а также внести изменения в параметры безопасности среды. Сделать это можно автоматически с помощью установщика среды LabVisual либо вручную.

Для установки необходимых параметров безопасности JAVA, скопируйте файл java.policy из папки с дистрибутивом LabVisual \prg\JRE_SEC\java.policy в папку X:\Program Files\Java\jre_zz\lib\security\ java.policy (где <u>X:\</u> - имя вашего системного диска, jre_zz – папка с JAVA).

Файл exception.sites из папки с дистрибутивом LabVisual \prg\JRE_SEC\exception.sites в папку X:\Users\USER_NAME\AppData\LocalLow\Sun\Java\Deployment\security\exception.sites (где X:\ - имя вашего системного диска, USER_NAME – папка с профайлом пользователя).



Рис. 5.2. Подпрограмма работы с прибором для первой серии экспериментов Дэвиссона и Джермера



Рис. 5.3. Подпрограмма работы с прибором для второй серии экспериментов Дэвиссона и Джермера

После запуска прибора сначала необходимо выбрать эксперимент нажатием многофункциональной кнопки «ВЫБОР/ВЫХОД ESC» (выбранный эксперимент указывается курсором >) и запустить его нажатием многофункциональной кнопки «СТАРТ(ЗАПУСК)/АВТОСКАН».

Для первого эксперимента РЕЖИМ-1 следует установить желаемый угол рассеяния θ, под которым будет сниматься дифрактограмма кнопками «УГОЛ - +», нажатием кнопок «УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ - +» осуществить сканирование спектра рассеянных электронов и получить зависимость интенсивности электронного тока в данном детекторе (в данном угле рассеяния θ) от ускоряющего напряжения. Для автоматического набора спектра с данного детектора следует нажать кнопку АВТОСКАН ВКЛ/ВЫКЛ которая соответственно включает и выключает автоматическое сканирование (автоматическое изменение ускоряющего напряжения электронной пушки). При включенном АВТО-СКАНЕ, полученные данные автоматически переносятся в текстовое поле программы с возможностью дальнейшего сохранения кнопкой «СОХРАНИТЬ ДАННЫЕ». Можно также установить галочку на пункте «ПОКАЗЫВАТЬ ГРА-ФИК ON-LINE», тогда полученные результаты будут отображаться в оn-line режиме в соответствующем окне программы в виде графика. По окончании первой серии экспериментов следует нажать кнопку «ВЫБОР/ВЫХОД ESC».

Для второй серии экспериментов электронная пушка и детектор установлены наилучшим образом согласно оригинальной схеме экспериментов рис. 2.10. При этом угол скольжения (α на рис. 2.6, ϕ на рис. 2.8, 2.9) равен 80° (а угол между нормалью от поверхности образца и падающим пучком соответственно 10°). Под таким же углом симметрично расположен датчик электронов.

Для снятия дифрактограммы второй серии опытов следует многофункциональной кнопкой «ВЫБОР/ВЫХОД ESC» выбрать РЕЖИМ-2 (выбранный эксперимент указывается курсором >) и запустить его нажатием многофункциональной кнопки «СТАРТ(ЗАПУСК)/АВТОСКАН». Затем нажатием кнопок «УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ - +» осуществить сканирование спектра рассеянных электронов и получить зависимость интенсивности электронного тока при угле скольжения 80° от ускоряющего напряжения. Для автоматического набора спектра с данного детектора следует нажать кнопку АВТОСКАН ВКЛ/ВЫКЛ которая соответственно включает и выключает автоматическое сканирование (автоматическое изменение ускоряющего напряжения электронной пушки). При включенном АВТОСКАНЕ, полученные данные автоматически переносятся в текстовое поле программы с возможностью дальнейшего сохранения кнопкой «СОХРАНИТЬ ДАННЫЕ». Можно также установить галочку на пункте «ПОКАЗЫВАТЬ ГРАФИК ON-LINE», тогда полученные результаты будут отображаться в on-line режиме в соответствующем окне программы в виде графика. По окончании первой серии экспериментов следует нажать кнопку «ВЫБОР/ВЫХОД ESC».

Результаты экспериментов, получаемые с помощью прибора УМК ФЯЛ-03 приведены на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Результаты экспериментов, полученные с помощью учебной установки ФЯЛ-03.
 а) — эксперимент по поверхностной дифракции электронов для угла рассеяния θ=60°;
 б) — эксперимент по объёмной дифракции для угла скольжения φ=80°

Для визуализации и последующего анализа полученных спектров в программном комплексе LabVisual служат два компонента – упрощенный компонент LabVisual Data Analizer рис. 5.5, вызываемый кнопкой «ВИЗУАЛИЗИРО-ВАТЬ ДАННЫЕ» и компонент с функциями сложного математического анализа для подробного анализа экспериментальных данных и построения графиков LabVisual «MagicPlot» рис. 5.6, вызываемый нажатием кнопки «АНАЛИЗИРО-ВАТЬ».



Рис.5.5. Пример работы компонента LabVisual Data Analizer.

Для загрузки какого-либо файла данных в LabVisual Data Analizer служит кнопка «ЗАГРУЗИТЬ», для отображения загруженных данных, а также после каких-либо внесенных изменений в график (цвет, символы для отображения и т. д.) следует нажимать кнопку «ОТОБРАЗИТЬ» для перерисовки. Открыв несколько вкладок данных нажатием на вкладку «+» и, загрузив в каждую вкладку данные из сохраненных файлов-данных, можно отобразить на рабочем поле семейство характеристик. Вкладка «+» для графиков служит для создание нескольких рабочих областей графиков, в каждую из которых также можно загрузить данные.

При этом положение центра пика достаточно точно можно найти подводя курсор мыши к вершине необходимого пика и считывая показания в области Х курсора, Y курсора (область выделена на рис. 5.5). В наборе данных, показанных на рис. 5.5 координаты центра пика: X курсора=U=973,2 Y курсора=I интенсивность = 152.

ВНИМАНИЕ! Для работы компонента MagicPlot для анализа данных необходимо установить последнюю версию исполняющей среды Java 7 (Runtime библиотеки виртуальной машины Java).





Для импорта данных в подпрограмму — анализатор следует воспользоваться командой Project — Import Text Table. При этом откроется стандартное диалоговое окно выбора файла.

В диалоге импорта файла рис. 5.7 выбрать кодировку (Encoding) UTF-8 и автоматическое определение разделения колонок (Column Delimiter – Auto Detect).

Для построения графика следует сначала выделить два столбца данных в проекте *.data в левом окне компонента (А и В по умолчанию) и использовать команду Table — Create Fit Plot – Line для отображения данных в виде плавной линии либо Table — Create Fit Plot - Marker, Line&Marker для отображения данных в виде экспериментальных точек. Полное выделение столбца (выделение всех данных столбца) осуществляется нажатием левой кнопки мыши на заголовке столбца.



Рис. 5.7. Импорт дифрактограммы, полученной на приборе в компонент MagicPlot для анализа данных

Если изначально столбцы не выделены, то по команде либо Table — Create Fit Plot - Marker, Line&Marker должно открыться диалоговое окно выбора колонок для построения графика. В качестве данных для оси X по умолчанию выбрать колонку A, в качестве данных для оси Y по умолчанию выбрать колонку B для построения зависимости B=B(A) рис. 5.8.

Fit Plot Properties: T10P49 A	×
Plot Data Canvas Axes General Ticks & Grid	Axis Style
Data Columns	
Table: 🛅 T10P49 T10P49	
Columns: X A Y B	Y - Baseline D
X Error © Error Columns Positive + <none> Negative - <none> © Percent of Data (%) • ± 1</none></none>	Y Error © Error Columns Positive + <none> • Negative - <none> • Percent of Data (%) • ± 1</none></none>
Legend Data Legend Data	Fit Sum Legend Fit Sum
	Close

Рис. 5.8. Построение графика с аппроксимацией.

После настройки графика закрыть данный диалог нажатием кнопки Close.

В появившемся окне графика данных щелкнуть правой кнопкой мыши в области окна и выбрать наилучший масштаб для отображения автоматически: Scale: Best View puc. 5.9.

Цвет символов данных, форму символов и другие параметры можно настроить вызвав диалоговое окно Data Style puc. 5.10 двойным щелчком левой кнопкой мыши на какой-либо экспериментальной точке данных на графике.

Анализ данных осуществляется командой Add - с соответствующим выбором функции для анализа данных и последующим нажатием кнопки Fit One Curve для приближения экспериментальных данных единичной функцией либо Fit by Sum для фитирования данных комбинацией нескольких функций. Допускается и рекомендуется в сложных случаях проводить приближение с помощью комбинации из нескольких функций (Fit by Sum).



Рис. 5.9. Настройка автомасштаба графика.

Line	Marker
Connect Line -	Marker 🗨 👻
👿 Break at Missing Points	Use Line Color
Line Color	Marker Size, pt 5.0 👻
Style 🗾 🗸	Edge Width, pt 1.0 👻
Width, pt 0.5	✓ Fill Marker ✓ Use Edge Color
	Mark Every 1 🗸 Point

Рис. 5.10. Настройка изображения и стиля графика.

Анализ данных с помощью компонента LabVisual MagicPlot.

Проведем для примера анализ третьего n=3 дифракционного максимума средствами **MagicPlot.** Анализ средствами упрощенного компонента LabVisual Data Analizer puc. 5.5 достаточно прост и сводится к определению центра пика визуально по положению курсора мыши.

Для начала на построенном графике FitPlot выберем необходимый интервал для аппроксимации нужного пика на вкладке Fit Intervals puc. 6.1.



Рис. 6.1. Выбор интервала для аппроксимации.

Интервал можно выбрать визуально, передвигая его границы с нажатой левой кнопкой мыши.

Затем следует перейти на вкладку Fit Curves и нажать кнопку Add. В появившемся диалоговом окне выбрать профиль линии — Gaussian puc.6.2. Полученный профиль (функция Гаусса) следует сначала вручную подогнать к профилю аппроксимируемой линии с помощью левой кнопки мыши, «цепляя» характерные выделенные точки линии и перемещая их с нажатой левой кнопкой мыши. Таким образом, функцию необходимо подвести под исследуемый пик.

Как следует из графика, одной функции Гаусса для аппроксимации данного сложного пика недостаточно, т. к. присутствует фон. Поэтому добавим кнопкой Add линейную функцию Line. Она будет играть роль функции для профиля фона рис. 6.3. Компонент автоматически покажет предварительный результат приближения, реализованный методом FitSum (обычно пунктирная линия).

Полученный профиль фона следует сначала вручную подогнать к реальному фону с помощью левой кнопки мыши, «цепляя» характерные выделенные точки линии и перемещая их с нажатой левой кнопкой мыши в диапазон аппроксимации.



Рис. 6.2. Выбор кривых для аппроксимации.



Рис. 6.3. Выбор кривой для подгонки фона.

Для осуществления окончательного анализа данного пика следует нажать кнопку Fit by Sum. Полученные результаты приведены на рис. 6.4. Как мы видим, пунктирная красная кривая — суперпозиция функции Гаусса и линейной функции фона — хорошо аппроксимирует данный пик (красная сплошная кривая — только функция Гаусса).



Рис. 6.4. Выбор кривой для подгонки фона.

Считать результаты анализа можно в правом окне параметров рис. 6.4. Положение центра пика равно x0 X Position= $\Delta U_{\text{макс эксп}}$ =69,4 B.

Согласно расчетам по формуле (3.12) для дифракционного максимума третьего порядка (n = 3) $\sqrt{\Delta U_{\text{макс теор}}} \approx 8,3 \text{ B}^{1/2}$, а согласно нашему экспериментальному анализу профиля линии $\sqrt{\Delta U_{\text{макс эксп}}} \approx 8,33 \text{ B}^{1/2}$.

Можно сделать вывод о правильности проведенного нами анализа дифрактограммы и распространить этот анализ на все пики дифрактограммы по очереди.

Программный модуль «ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЩЕЛЯХ». Эксперимент-3.

Среда LabVisual позволяет дополнительно провести виртуальный эксперимент с помощью входящего в комплект модуля «ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЩЕЛЯХ», запускаемого нажатием кнопки «ЭКСПЕРИМЕНТ-3» из главного окна программы-оболочки рис. 7.1.



Рис. 7.1. Виртуальный эксперимент «ДИФРАКЦИЯ НА ЩЕЛЯХ».

В компьютерной модели можно изменять период решетки d и скорость электронов υ, которая определяет длину волны λ де Бройля. В правой части экрана возникает усредненное за длительное время распределение числа электронов, попадающих в разные точки фотопластинки. Это распределение совпадает с кривой распределения интенсивности света при дифракции на одномерной решетке.

В центре экрана моделируется вероятностный процесс попадания отдельных электронов на фотопластинку. Обратите внимание, что при длительном наблюдении на фотопластинке проявляются не только главные максимумы, но также и относительно слабые побочные максимумы дифракционной картины.

Для расчетов данной дифракционной картины частиц следует пользоваться полученными ранее формулами (4.1) — (4.4).

Подготовка к эксперименту.

- 1. Перед включением установки в сеть проверить целостность всех соединительных сигнальных и сетевых проводов. Все работы по подключению комплекса к компьютеру следует выполнять только при отключенных от сети приборах. Разобраться с принципиальными блок-схемами опытов, в назначении кнопок, переключателей и ручек прибора.
- 2. Соединить монитор с системным блоком ПЭВМ, подключить клавиатуру и мышь к системному блоку используя стандартные провода для подключения. Подключить системный блок ПЭВМ и монитор к сети ~220 В.
- 3. Загрузить операционную систему согласно стандартным процедурам загрузки.
- 4. При необходимости, настроить компьютер для работы с учебной установкой согласно пункту «ПРОГРАММНАЯ ЧАСТЬ».
- 5. Запустить программу LabVisual для работы с учебной установкой для данного эксперимента пользуясь ярлыком на рабочем столе либо другим способом, указанным лаборантом.

Порядок выполнения. Проведение эксперимента.

- 1. Перед включением следует проверить целостность всех соединительных и сетевых проводов устройств.
- 2. Включите лабораторный модуль в сеть ~220 В. Подключите ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ к БЛОКУ ДАТЧИКОВ прилагаемым кабелем 25 PIN (аналог LPT с полной независимой распайкой всех контактов). Подключите прибор к LAN порту ПК (сетевой карте), если вы планируете работу в автоматизированном режиме, предварительно настроив сетевые параметры
- 3. Перевести переключатель СЕТЬ на панели установки в положение «ВКЛ» при этом должен загореться соответствующий сигнальный светодиод. Дать прибору прогреться не менее 2-3 минут.
- Выбрать с помощью программы-оболочки либо с помощью кнопок управления на учебном приборе РЕЖИМ-1 «Дифракция электронов на поверхности образца». Выбранный эксперимент указывается курсором > на LCD дисплее прибора.
- 5. Запустить выбранный эксперимент нажатием многофункциональной кнопки «СТАРТ(ЗАПУСК)/АВТОСКАН».
- 6. Для первого эксперимента РЕЖИМ-1 следует установить желаемый угол рассеяния θ, под которым будет сниматься дифрактограмма кнопками «УГОЛ +». Начинать измерения рекомендуется как и в оригинальном эксперименте с угла рассеяния θ=50° рис. 2.3 2.4.
- 7. Нажатием кнопок «УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ +» осуществить сканирование спектра рассеянных электронов и получить зависимость интенсивности электронного тока в данном угле рассеяния θ от ускоряющего напряжения. Для автоматического набора спектра с данного детектора следует нажать кнопку АВТОСКАН ВКЛ/ВЫКЛ которая соответственно включает и выключает автоматическое сканирование (автоматическое изменение ускоряющего напряжения электронной пушки). При включенном АВТОСКАНЕ, полученные данные автоматически переносятся в текстовое поле программы с возможностью дальнейшего сохранения кнопкой «СОХРАНИТЬ ДАННЫЕ». Можно также установить галочку на пункте «ПОКАЗЫВАТЬ ГРАФИК ON-LINE», тогда полученные результаты будут отображаться в оп-line режиме в соответствующем окне программы в виде графика.
- 8. Сохранить полученные результаты в файл данных и дать осмысленное название данному файлу (например theta50.data).
- Вручную либо с помощью встроенных компонент для анализа данных определить ускоряющее анодное напряжение ΔU_{макс.}, при котором наблюдается максимальный электронный ток при данном угле рассеяния θ рис. 5.4 а).

- 10. По формулам (1.4) и (1.5) рассчитать кинетическую энергию электронов Е_{к макс} при данном ΔU_{макс} (в [Дж] и в [эВ], 1эВ=1,6·10⁻¹⁹ Дж) и рассчитать соответствующую длину волны де Бройля λ_Б в системе СИ.
- 11. По формуле (2.1) рассчитать период решетки d_{эксп} и перевести рассчитанное значение в [нм] для данного угла рассеяния θ.
- 12. Повторить действия пп. 6 11 для не менее четырех углов рассеяния в диапазоне θ=20° ... 80°.
- 13. По полученным данным рассчитать среднее значение периода решетки <d_{эксп}> и сравнить ваши результаты с табличным значением для данного эксперимента при данной ориентации образца никеля d_{Ni теор.}=0,215 нм.
- 14. По окончании первой серии экспериментов следует нажать кнопку «ВЫ-БОР/ВЫХОД ESC».
- 15.Для снятия дифрактограммы второй серии опытов следует многофункциональной кнопкой «ВЫБОР/ВЫХОД ESC» выбрать РЕЖИМ-2 (выбранный эксперимент указывается курсором >) и запустить его нажатием многофункциональной кнопки «СТАРТ(ЗАПУСК)/АВТОСКАН».
- 16.Нажатием кнопок «УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ +» осуществить сканирование спектра рассеянных электронов и получить зависимость интенсивности электронного тока при угле скольжения φ=80° от ускоряющего напряжения. Для автоматического набора спектра с данного детектора следует нажать кнопку АВТОСКАН ВКЛ/ВЫКЛ которая соответственно включает и выключает автоматическое сканирование (автоматическое изменение ускоряющего напряжения электронной пушки). При включенном АВТОСКАНЕ, полученные данные автоматически переносятся в текстовое поле программы с возможностью дальнейшего сохранения кнопкой «СОХРАНИТЬ ДАННЫЕ». Можно также установить галочку на пункте «ПОКАЗЫВАТЬ ГРАФИК ON-LINE», тогда полученные результаты будут отображаться в on-line режиме в соответствующем окне программы в виде графика.
- 17. Сохранить полученные результаты в файл данных и дать осмысленное название данному файлу (например phi80.data).
- 18. Вручную либо с помощью встроенных компонент для анализа данных определить значения ускоряющих анодных напряжений ΔU_{макс. n} (положения центров пиков), при которых наблюдаются максимальные электронные токи для каждого порядка дифракции n puc 5.4 б).
- 19. По формуле (3.4) рассчитать показатель преломления волн де Бройля внутри кристалла никеля n*, считая, что внутренний потенциал образца никеля постоянен и равен U₀≈15 B, в качестве ΔU следует брать найденные вами экспериментальные значения ΔU_{макс. n} (положение центра кадого из пиков), при котором наблюдается максимальный электронный ток для каждого порядка дифракции n (n* немного разный при различном ΔU).

- 20. По формуле (1.5) рассчитать длину волны де Бройля для электронов в данном порядке дифракции n и кинетическую энергию электронов E_k. **Расчеты по формулам производите в СИ.**
- 21. По формуле (3.10) рассчитать d_{эксп. n} межплоскостное расстояние при данной ориентации образца для каждого порядка дифракции n. Угол скольжения φ=80°.
- 22. Вычислить среднее значение $< d_{_{3ксп.}} >$ и сравнить его с табличным значением $d_{_{табл.}} = 0,203$ нм.
- 23. Проделать ЭКСПЕРИМЕНТ-3 «ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЩЕ-ЛЯХ». Этот эксперимент виртуальный и выполнятся с помощью встроенного в среду LabVisual модуля, вызываемого нажатием кнопки «МУЛЬТИ-МЕДИА РЕСУРСЫ» либо «ЭКСПЕРИМЕНТ-3».
- 24. Внимательно рассмотрите схему опыта на экране монитора (рис. 7.1) и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.
- 25. Движком регулятора периода решетки установите значение d=1,5·10⁻¹⁰ м.
- 26. Движком регулятора скорости электронов установите значение скорости частиц в диапазоне υ=1,5·10⁷ ... 2,5·10⁷ м/с.
- 27. Нажмите мышью кнопку «Старт» и наблюдайте движение электронов через одномерную модель дифракционной кристаллической решётки и их регистрацию на фотопластинке.
- 28. Определите по шкале, расположенной в правой части окна, координаты первых трёх максимумов интенсивности дифракционной картины и запишите эти значения в табл.2.

Таблица 2

V ₁ =				V ₂ =					
λ	X _{m1}	X _{m2}	X _{m3}	d _{э сред}	λ	X _{m1}	X _{m2}	X _{m3}	d _{э сред}
də					da				

- 29. Установите поочередно другие 2 3 значения скорости о и повторите эти измерения ещё раз.
- 30. Рассчитайте для каждого значения x_m по формуле (4.4) период дифракционной решётки dэ, запишите эти данные в табл. 1 и сравните полученное среднее значение с установочным.
- 31. Проведите оценку погрешности измерений.
- 32. По окончании работы отключить установку от сети, поставив переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ» и вынуть сетевую вилку из розетки.
- 33. Выключите ПЭВМ согласно стандартной процедуре выключения персонального компьютера.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется дифракцией?

2. Сформулируйте гипотезу де Бройля

3. Что называется длиной волны де Бройля?

 Выведите формулу Брэгга-Вульфа с учетом преломления волн де Бройля внутри кристалла.

5. Опишите схемы опытов Дэвиссона и Джермера.

6. Какие противоречия привели к появлению теории корпускулярно-вол-новой двойственности частиц?

7. Определить длину волны де Бройля электрона, прошед-шего ускоряющую разность потенциалов 70 В, 700 кВ (релятивистский случай).

8. Выразите длину волны де Бройля через ускоряющий потенциал для не рялитивистского и релятивистского случая.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы: Учебное пособие для физич. спец. вузов. – 3-е изд. стер. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 256 с.
- Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомоного ядра и элементарных частиц. – М.: КноРус, 2012. – Т.3. – 368 с.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. М.: ФИЗМАТЛИТ, МФТИ, 2006. – Т.5. – 784 с.
- Трофимова Т.И. Курс физики. 20-е изд., стер. М.: Изд-во «Академия», 2014. – 560 с.
- Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. 9-е изд., стер. М.: Изд-во «Академия», 2014. – 720 с.

ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»