

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЛН**В. И. Милютин**

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытие волновой природы частиц Де-Бройлем¹ и блестящее подтверждение ее опытами Девиссона и Джермера² послужили толчком к развитию оптики частиц. Быстрое развитие получила геометрическая электронная оптика. После того как Буш³ указал на фокусирующие действия аксиально-симметричных электрических и магнитных полей и на возможность получать изображения с помощью электронных лучей, много исследований было посвящено отдельным вопросам геометрической электронной оптики. На базе этих исследований созданы современные электронно-оптические приборы и самый совершенный из них — электронный микроскоп. Геометрическая электронная оптика по своей законченности приближается сейчас к геометрической световой оптике.

Однако этого нельзя сказать относительно волновой электронной оптики. Ее по существу нет. Волновые свойства электронов, особенно связанные с движением их в вакууме, долгое время не были предметом глубокого теоретического и экспериментального исследования. Такие явления, как интерференция, дифракция, поляризация, хорошо известные в световой оптике, почти совсем не исследовались в электронной оптике.

Исключением является дифракция электронов в кристаллах, которая изучена достаточно хорошо и в настоящее время используется как мощный метод исследования структуры кристаллических тел. Но и здесь основное внимание уделялось больше свойствам кристаллов, в которых происходит дифракция электронов, нежели волновым свойствам самих электронов.

Что касается интерференции электронных волн, то изучение этого явления, особенно экспериментальное, задерживалось наличием принципиальных трудностей. Принципиально другой характер излучения электронов и значительно меньшая длина волны, по сравнению со световыми волнами, долгое время не позволяли осуществлять с электронами интерференционные опыты типа опытов Юнга и Френеля в световой оптике.

Не ясно было, как получить когерентные электронные пучки, необходимые для получения интерференции, и как наблюдать интерференционную картину. Из-за малости длины волны расстояния между интерференционными полосами должны быть настолько малыми, что для их наблюдения необходим прибор с хорошей разрешающей способностью и достаточно большим увеличением. И только развитие электронного микроскопа и техники электронно-микроскопического исследования позволило осуществить опыты по интерференции электронных волн.

В 1940 г. Бершу⁴ впервые удалось наблюдать в электронном микроскопе так называемые дифракционные полосы Френеля, возникающие вблизи края объекта, при некоторой дефокусировке изображения. Теория

образования этих полос была предложена Хийе и Рамбергом⁵. Полосы Френеля—это результат дифракции от «макроскопического» тела (край объекта), что отличается от дифракции в кристаллах, где явление основано на взаимодействии электронных лучей с атомарной структурой объекта.

Дальнейшие наблюдения интерференции электронных волн связаны с электронно-микроскопическими исследованиями деформированных кристаллических пленок⁶⁻⁹, в которых часто создаются условия для расщепления пучка электронов на несколько когерентных пучков и их интерференции.

Первые попытки построения электронного интерферометра были осуществлены Мартоном¹⁰⁻¹¹, использовавшим для получения когерентных электронных пучков и их последующего воссоединения дифракцию от тонких кристаллических слоев, и Мелленштедтом и Дюкером¹²⁻¹⁴, расчленившим электронный пучок в электростатическом поле (бипризма Френеля).

В последнее время сделаны попытки¹⁵ осуществить и известный в световой оптике опыт Юнга для электронных лучей. Для этой цели использовалось прохождение электронов через маленькие и близко расположенные отверстия в металлизированной коллодиевой пленке в электронном микроскопе. Удалось получить, правда едва заметные, интерференционные полосы.

Обращает на себя внимание полная аналогия экспериментов по осуществлению электронной интерференции с опытами по интерференции световых волн. Однако из-за малости длины волны электронов при осуществлении интерференции электронных волн встречаются большие экспериментальные трудности. Необходима высокая точность электронно-оптической аппаратуры и высокая стабилизация источников питания.

Ниже мы опишем кратко эксперименты по интерференции электронных волн, схемы первых электронных интерферометров и некоторые области их применения.

2. О КОГЕРЕНТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЛН

Прежде чем описывать эти эксперименты, рассмотрим некоторые общие вопросы, связанные с интерференцией электронных волн, и, в частности, вопрос о когерентности.

Как известно, интерференция имеет место при наложении двух и более когерентных волн, т. е. таких волн, разность фаз которых не меняется со временем. Единственным способом получения когерентных электронных волн, как и в световой оптике, является расчленение одного пучка электронов на два или более. Но для этого сам расчленимый пучок должен, с одной стороны, содержать электроны с одинаковой длиной волны и, с другой стороны, эта длина волны должна быть постоянной во времени. Такой пучок обычно называют когерентным. Учитывая, что масса электронов одинакова, это требование сводится, на основании соотношения Де-Бройля $\lambda = \frac{h}{mv}$, к постоянству скорости электронов в пучке.

Однако казалось, что разброс начальных скоростей электронов, который всегда имеет место, не играет существенной роли при высоких ускоряющих напряжениях, например таких, как это имеет место в электронных микроскопах (50—100 кВ). Более существенным является постоянство этого напряжения во времени. Поэтому для получения когерентного пучка необходимо иметь высоко стабилизированный источник высокого напряжения. Высокое напряжение необходимо также для уменьшения влияния посторонних электрических и магнитных полей, а также для уве-

личения проникающей способности электронов, проходящих через вещество.

Говоря о когерентном пучке, необходимо рассмотреть вопрос о когерентной длине пучка.

Под когерентной длиной в световой оптике понимается длина цуга правильных синусоидальных волн, испускаемых атомом за время одного акта излучения. Если считать это время, например, порядка 10^{-8} сек, то когерентная длина $L_{\text{ког}} = 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-8} = 300$ см. При длине волны $\lambda = 5 \times 10^{-5}$ см она составляет $6 \cdot 10^6$ длин волн. Когерентная длина определяет максимальную разность хода двух лучей, при которой возможна интерференция¹⁶. Чем длиннее цуг волн, испускаемых атомом, тем при большей разности хода возможна интерференция. В интерферометре Майкельсона, например, для линий кадмия удавалось наблюдать интерференцию при разности хода около миллиона длин волн.

В экспериментах по электронной интерференции нет полной ясности в вопросе о когерентной длине. По аналогии со световой оптикой она экспериментально определяется по максимальному числу наблюдаемых полос интерференции, т. е. по максимальной разности фаз, при которой еще имеет место интерференция.

Если это число N и длина волны λ , определяемая из соотношения де-Бройля, то когерентная длина $L_{\text{ког}} = N\lambda$.

Если учесть немонохроматичность электронных волн, вызванную различием скоростей электронов в пучке, то максимальное количество полос N найдется из условия:

$$N\lambda_1 = (N + 1)\lambda_2$$

или

$$N = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{\lambda}{d\lambda},$$

где $d\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ — интервал длин волн, соответствующий интервалу скоростей электронов пучка.

Для электронов $\lambda = \text{const } U^{-1/2}$ (U — ускоряющее напряжение), а $|d\lambda| = \frac{1}{2} \text{const } U^{-3/2} dU$.

Следовательно,

$$N = \frac{\lambda}{d\lambda} = 2 \frac{U}{dU}. \quad (1)$$

Если считать для термоэлектронов $dU = 0,25$ в, то максимальное число полос интерференции, например, для напряжения $U = 25\,000$ в должно быть равным

$$N = 2 \frac{25\,000}{0,25} = 200\,000.$$

А когерентная длина для этого напряжения ($\lambda = 0,075 \text{ \AA}$) равна

$$L_{\text{ког}} = N\lambda = 2 \cdot 10^5 \cdot 0,075 \text{ \AA} = 15 \cdot 10^3 \text{ \AA}.$$

Данные эксперимента пока что сильно расходятся с этой оценкой.

Нужно сказать, что точное определение максимально возможного числа полос в данных условиях эксперимента представляет собой технически очень трудную задачу, поэтому данные о когерентной длине, указываемые различными авторами, сильно отличаются друг от друга. Мы приведем их ниже.

В связи с вопросом о когерентной длине и механизмом интерференции электронных волн интересно рассмотреть вопрос о количестве электронов, которые одновременно должны находиться в когерентном пучке.

По почернению эмульсии на участке, занимаемом интерференционной картиной, Фаже и Фер¹⁵ в своих экспериментах определили заряд, а затем и количество электронов, падающих в секунду на этот участок. Оказалось, что при некоторой интенсивности пучка, например, на участок интерференционной картины, порядка 1 мм^2 падает 12 000 электронов в секунду. Если учесть, что их скорость при ускоряющем напряжении 50 кВ составляет примерно $120\,000 \text{ км/сек}$, то среднее расстояние между электронами окажется равным порядка 10 км , т. е. когда один электрон достигает эмульсии, следующий электрон еще не вылетел из катода. Несмотря на это, на эмульсии наблюдается интерференционная картина. Это показывает, что для интерференции электронных волн совсем не обязательно одновременное прохождение большого числа электронов. Электрон интерферирует «сам с собой».

На аналогичный факт еще раньше было указано Биберманом, Сушкиным и Фабрикантом¹⁷, которые экспериментально получили дифракционную картину для электронов, поодиночке проходящих через дифракционную систему.

Вообще нужно сказать, что вопрос о когерентности электронных волн является очень сложным и пока недостаточно изучен. Первую попытку теоретического рассмотрения вопроса о когерентности электронных волн, особенно проходящих через вещество, а также попытку создания общей теории электронного интерферометра сделал Габор¹⁸. Рассмотрение этой теории выходит за рамки данной статьи.

Для создания когерентных электронных лучей используются два типа расщепления пучков:

а) расщепление амплитуды электронной волны и б) расщепление волнового фронта. Первый тип расщепления осуществляется путем дифракции электронных пучков при прохождении тонких кристаллических слоев, а второй — путем отклонения электронов пучка в специальных электрических полях.

3. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ НА КРАЮ ОБЪЕКТА

Когда электронный микроскоп достиг такого совершенства, что можно было различать частицы размером меньше 100 \AA , стало возможным при некоторых условиях наблюдать интерференционные полосы Френеля, возникающие вблизи границ непрозрачных или полупрозрачных для электронов объектов.

Теория образования френелевых полос на электронно-микроскопических изображениях для малой апертуры освещения была дана Хийе и Рамбергом⁵. Образование полос рассматривается как результат интерференции неискаженных плоских волн, пересекаемых краем непрозрачного или полупрозрачного объекта, и цилиндрических волн, исходящих от этого края. Интенсивность цилиндрической волны максимальна в прямом направлении и монотонно падает по обе стороны от этого направления. Ее фаза запаздывает на $\frac{1}{8}$ периода по отношению к плоской волне внутри тени и опережает ее на $\frac{3}{8}$ периода с светлой области. Распределение интенсивности в этой интерференционной картине зависит от степени дефокусировки объектива и условий освещения объекта. На рис. 1 показана кривая распределения интенсивности на экране при освещении параллельным пучком электронов.

Расстояние максимумов и минимумов кривой распределения интенсивности от края тени непрозрачного объекта определяется из следующих выражений:

$$y_{\max} = \sqrt{2l\lambda \left(n + \frac{3}{8}\right)}, \quad y_{\min} = \sqrt{2l\lambda \left(n - \frac{1}{8}\right)}, \quad (2)$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

где λ —длина волны и l —расстояние от объекта до плоскости установки.

В случае полупрозрачных объектов картина интерференции несколько усложняется. В этом случае, в результате интерференции проходящего через объект волнового фронта и цилиндрических волн, исходящих от края объек-

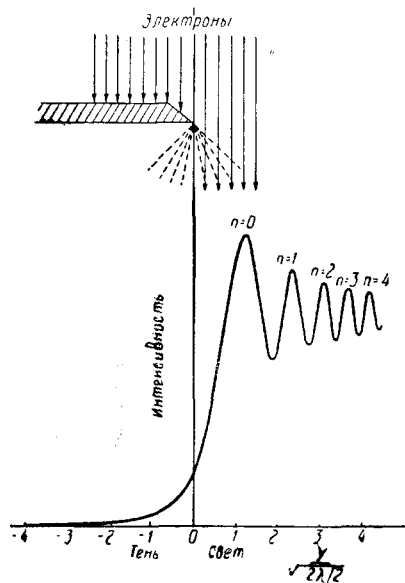


Рис. 1. Образование полос Френеля на краю непрозрачного экрана.

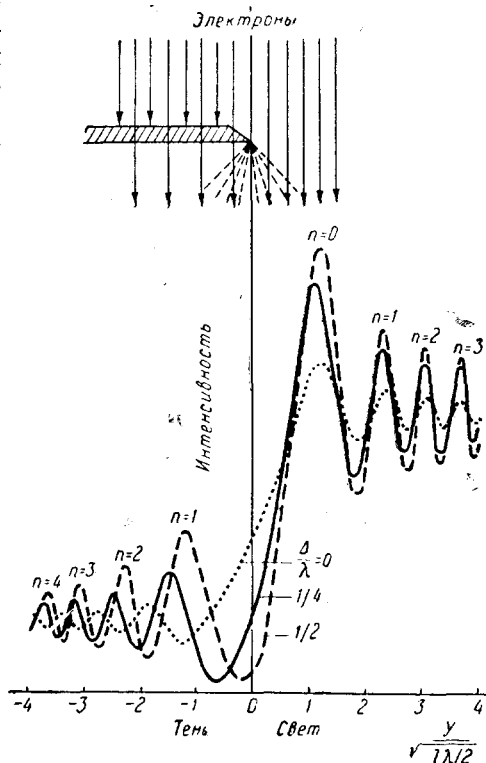


Рис. 2. Образование полос Френеля на краю полупрозрачного экрана.

та, образуются полосы также и в области тени. Фаза проходящей через объект волны может меняться относительно волны, проходящей мимо объекта, в зависимости от его толщины и материала. Распределение интенсивности в этом случае будет зависеть от разности фаз этих волн.

На рис. 2 показаны расчетные кривые распределения интенсивности для различных разностей фаз $2\pi \frac{\Delta}{\lambda}$ (где Δ —разность хода) для случая перефокусировки изображения, т. е. когда плоскость установки ниже объекта и объект пропускает $1/4$ интенсивности падающего на него пучка.

Как видно из рисунка, с увеличением разности хода, а следовательно и разности фаз, изменяются величины максимумов и минимумов, а также и их положения в области тени.

На рис. 3, для примера, показаны полосы Френеля от края полупрозрачного экрана, образуемого угольной пленкой толщиной 150 \AA .

Полосы Френеля, образующиеся при прохождении электронов через различные пленки, позволяют определить вносимую ими разность фаз, а затем и толщину пленок, если известны их внутренние потенциалы и длина волны электронов. И наоборот, зная толщину пленки, можно опре-

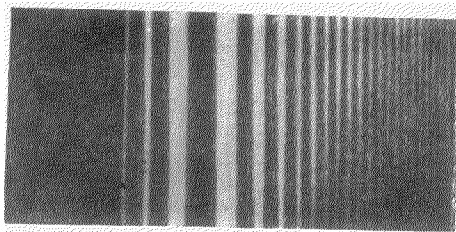


Рис. 3. Полосы Френеля от края угольной пленки.

делить ее внутренний потенциал. Наличие контурных полос Френеля на электронно-микроскопическом изображении широко используется для изучения астигматизма линз электронного микроскопа.

4. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В ТОНКИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЯХ

При исследованиях в электронном микроскопе тонких слоев некоторых монокристаллов, как выше отмечено, был обнаружен новый тип интерференции. Речь идет о таких монокристаллических пленках (на-

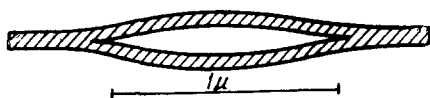


Рис. 4. Типичная форма пузыря в деформированном кристалле.

пример, слюда, мусковит и др.), которые при определенных условиях (например, при нагревании) расщепляются на тонкие слои, образуя часто в отдельных местах небольшие пустые полости (пузыри). Как показывают эксперименты, эти полости ограничены двумя расположенными друг над другом слегка изогнутыми тонкими слоями. Представление о форме такого пузыря дает рис. 4.

Размер пузырей и их форма зависят от материала и методики приготовления пленок. Например, для мусковита диаметр полости имеет порядок 1—1,5 μ , а высота в середине около 500 Å .

На рис. 5 показано типичное электронно-микроскопическое изображение такой деформированной пленки слюды. Ясно видны изображения пузырей с системой темных линий внутри них. Не вдаваясь в подробное рассмотрение этих сложных картин (подробности см. ^{8, 9, 10}), мы кратко остановимся на имеющей здесь место интерференции электронных лучей, дифрагировавших на двух кристаллических слоях, ограничивающих пузырь.

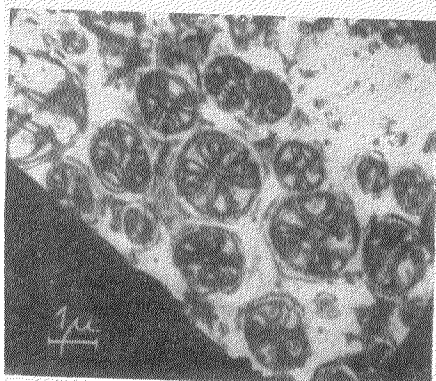


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение деформированной пленки слюды.

При прохождении электронами верхнего изогнутого слоя кристалла в тех его местах, для которых выполняется условие Вульфа-Брегга,

происходит отклонение электронных лучей (см. рис. 6). Благодаря контрастной диафрагме, расположенной ниже объектива, отклоненные элек-

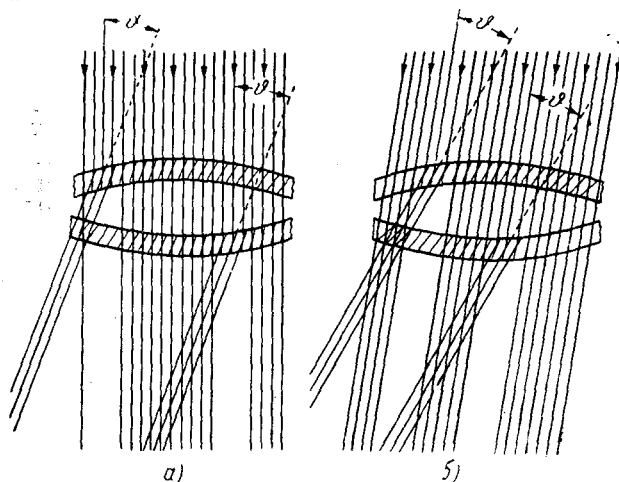


Рис. 6. Схема образования дифракционных рефлексов при прохождении электронами двух изогнутых кристаллических слоев (для двух наклонов падающих электронных лучей).

троны не попадают на изображение. В результате соответствующие места на изображении оказываются темными. Так образуются темные линии равного наклона, называемые иногда характеристическими линиями. Угол отклонения θ электронного луча определяется из условия Вульфа-Брегга

$$n\lambda = 2d \sin \frac{\theta}{2}, \quad (3)$$

где λ —длина волны, d —постоянная кристаллической решетки, n —порядок интерференции.

То же самое происходит и на нижнем изогнутом слое. Образование линий равного наклона схематически показано на рис. 7. Линии, видимые на электронно - микроскопическом изображении (рис. 5), имеют подобное происхождение.

Важно отметить, что такие характеристические темные линии появляются только при изображении кристаллических слоев, даже однородных по плотности. При изображении подобных слоев из аморфного материала эти линии отсутствуют. Этот факт доказывает правильность высказанных здесь рассуждений.

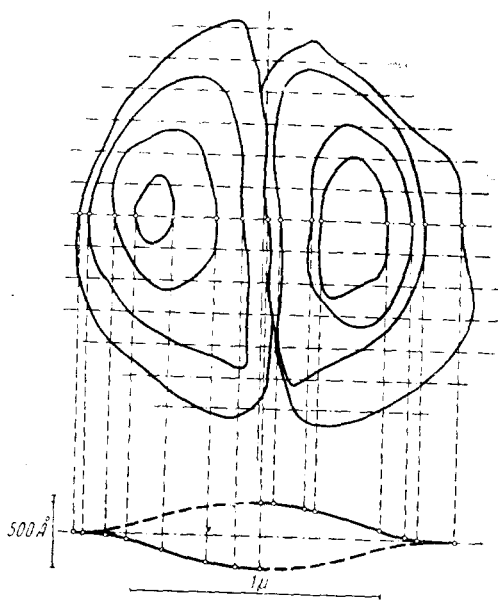


Рис. 7. Образование линий равного наклона при прохождении электронов через пузырь, изображенный на рис. 4.

Этот факт доказывает правильность высказанных здесь рассуждений.

Исследование характеристических кривых на электронных изображениях кристалла, проведенное Рангом^{8,9} для слюды и мусковита, а Мелленштедтом⁷ для подистого свинца, позволили достаточно точно определить размеры и форму вышеуказанных пузырей, возникающих в пленках монокристалла.

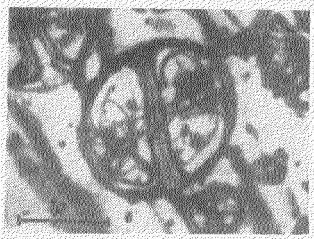


Рис. 8. Полосы интерференции (в середине снимка), возникающие при наложении двух рефлексов.

При изменении угла наклона падающих на кристалл электронных лучей (см. рис. 6, б) расстояния между рефлексами от верхнего и нижнего слоя изменяются. При некотором угле наклона эти рефлексы перекрываются и дифрагированные лучи интерферируют друг с другом. В середине изображения пузыря, там, где два рефлекса накладываются друг на друга, появляются поперечные полосы интерференции (рис. 8), при этом оказывается, что интерферируют рефлексы, возникающие в местах пленки, удаленных друг от друга на расстоянии порядка 100 \AA (так называемая дальняя интерференция). Судя по числу наблюдаемых полос, разность хода между интерферирующими лучами в этих экспериментах не превышала 20 длин волн.

Для более детального исследования описанных интерференционных картин их лучше наблюдать на темнопольных изображениях, на которых можно соответствующим положением контрастной диафрагмы выделить желаемые рефлексы и отсеять остальные. В светлопольном изображении одновременно наблюдаются рефлексы от различных плоскостей решетки. Схема получения темнопольного изображения показана на рис. 9.

На рис. 10, а и б показаны два темнопольных изображения, отличающиеся друг от друга углом наклона падающих на кристалл лучей. Рефлексы здесь изображаются светлыми линиями (позитив). На снимке а) рефлексы не накладываются друг на друга и интерференции не заметно. На снимке б) рефлексы перекрываются и заметны поперечные светлые интерференционные полосы.

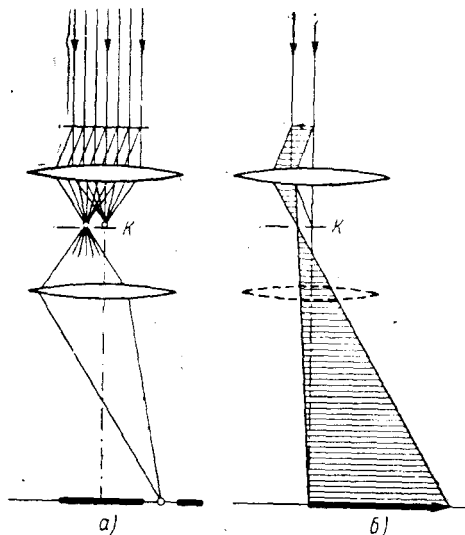


Рис. 9. Схема получения темнопольных снимков: а) дифракция, б) изображение.

5. ДИФРАКЦИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

Рассмотренные выше эксперименты по наблюдению интерференции основаны на использовании естественных дифракционных элементов, расчлняющих падающий на них электронный пучок на когерентные компоненты. Однако эти эксперименты нельзя непосредственно использовать для построения электронных интерферометров с управляемыми парамет-

рами ввиду случайного характера возникновения условий интерференции в подобных экспериментах.

Попытки создания электронного интерферометра были основаны на светооптической аналогии.

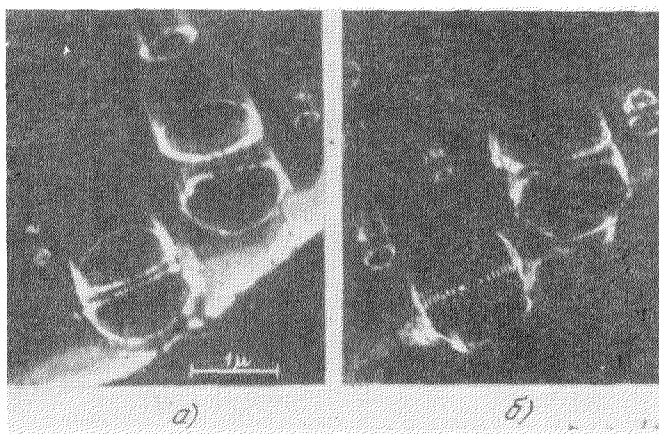


Рис. 10. Наблюдение интерференции на темнопольном изображении (110-рефлекс).

Но использование хорошо известных в световой оптике методов Юнга и Френеля оказалось, вначале, очень трудным. Для их осуществления необходимо иметь когерентные источники очень малых размеров (сравнимых с длиной волны) и высокой стабильности (ниже мы более подробно рассмотрим требования к когерентным источникам). Поэтому эксперимен-

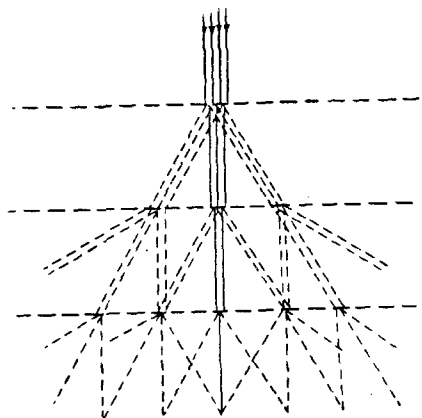


Рис. 11. Дифракция электронов на трех кристаллических слоях.

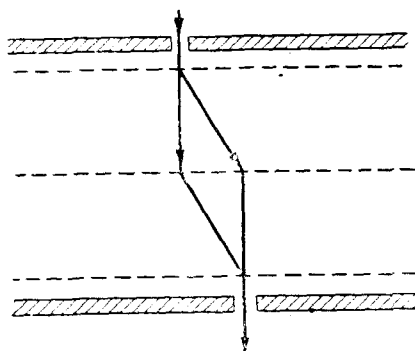


Рис. 12. Схема дифракционного интерферометра с тремя кристаллами.

таторы пошли сначала по пути использования широких электронных пучков, применяя для расщепления пучков дифракцию на тонких кристаллических слоях толщиной порядка 100 атомных слоев.

Впервые такой принцип построения электронного интерферометра предложил Мартон¹⁰. Три тонких кристаллических слоя располагаются параллельно на некотором расстоянии друг от друга (рис. 11). Параллельный пучок электронов, падающий на первый слой, дифрагирует, образуя ряд когерентных пучков (расщепление амплитуды), каждый из которых,

проходя второй кристаллический слой, снова расщепляется благодаря дифракции. То же самое происходит на третьем слое. Угол между дифрагировавшими пучками с энергией 60 кэв для большинства кристаллов составляет $2 \cdot 10^{-2}$ радиана.

Помещая ограничивающие диафрагмы, как это показано на рис. 12, можно выбрать из множества показанных на рис. 11 когерентных пучков два дифрагированных пучка, которые будут интерферировать друг с другом. Угол между ними не должен быть больше 10^{-3} радиан, чтобы они могли пройти апертуру объектива. В действительности этот угол не превышал $2,5 \cdot 10^{-5}$. Геометрия хода когерентных лучей, показанная на рис. 12, подобна той, что имеет место в световых интерферометрах типа Маха—Цендера и Майкельсона. Принципиальная разница в геометрии заключается только в том, что угол между электронными пучками составляет около 0,02 радиана вместо обычного $\frac{\pi}{2}$.

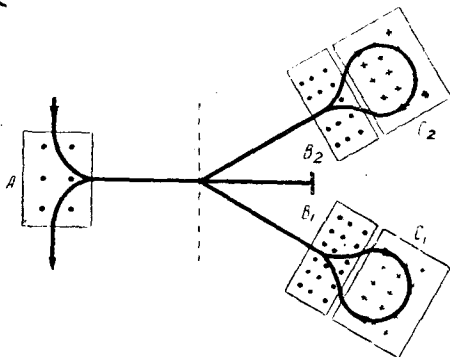


Рис. 13. Схема интерферометра с одним кристаллом и магнитными полями.

Мартоном предложена и вторая схема построения интерферометра, использующая только один кристалл (рис. 13). В этом случае падающий пучок отклоняется под прямым углом магнитным полем A и проходит тонкий кристалл. Проходя кристалл, пучок частично проходит без отклонения, частично же дифрагирует. Проходящий пучок задерживается специальной мишенью. Два дифрагированных пучка отклоняются магнитными полями B_1 , B_2 и C_1 , C_2 так, как показано на рисунке, и соединяются на кристалле, образуя пучок, идущий навстречу падающему. Магнитное поле A отклоняет его вниз. В этом случае можно легко менять разность хода между интерферирующими пучками.

Из двух указанных здесь схем построения электронного интерферометра вторая еще технически не реализована. Что касается первой схемы, использующей дифракцию на трех кристаллах, то она уже реализована и на ее основе построен первый интерферометр¹¹.

Основной частью прибора является приспособление с тремя кристаллическими пленками толщиной около $100\text{--}150 \text{ \AA}$ и диаметром около 3 мм. Конструкция приспособления (рис. 14) обеспечивает вращение кристаллов вокруг оптической оси и перемещение их вдоль оси. Фиксированное расстояние между кристаллами равно 3,48 см. Кристаллические слои получают напылением металла на подложку из каменной соли и последующим растворением последней. Наиболее пригодными металлами для этой цели оказались золото, никель и медь. Толщина слоя рассчитывается по массе испаренного металла и геометрии испарителя. Степень ориентации кристалла определяется из дифракционной картины.

Приспособление с кристаллами размещается в обычном магнитном электронном микроскопе вместо его камеры объектов. Электронная пушка

и конденсор служат для создания электронного пучка. Рабочее напряжение пушки составляет 60 кВ и ток пучка примерно 300 мкА. Объективная и проекционная линзы служат для наблюдения интерференционных полос.

Вообще, кроме камеры объектов, конструкция микроскопа остается почти неизменной. Для уменьшения интенсивности пучка неупруго рассеянных электронов диафрагма объектива уменьшена до 75 мкм, а диафрагма конденсора составляет 200 мкм. Апертура конденсора обеспечивает максимальную интенсивность при минимальной термической нагрузке на кристалл.

Для нормальной работы интерферометра необходима тщательная юстировка всех его элементов, особенно кристаллов. Юстировка производится обычными электронно-микроскопическими методами. Кристаллы устанавливаются так, чтобы дифракция нулевого порядка совпадала с оптической осью.

Объектив фокусируется на третий кристалл для получения наивысшего углового разрешения. Проекционная линза устанавливается на желаемое увеличение. При максимальной интенсивности электронно-оптическое увеличение составляет

примерно 700 крат. Разрешающая способность прибора и фотоэмulsion позволяет наблюдать интерференционные полосы шириной порядка 1000 Å.

Согласно данной Симпсоном²¹ геометрической теории этого прибора максимальная разность хода между интерферирующими пучками определяется следующим выражением:

$$\Delta = \frac{ld\theta^2}{y}, \quad (4)$$

где l —расстояние между кристаллами, d —постоянная кристаллической решетки, θ —дифракционный угол, y —расстояние между полосами.

Наиболее разрешаемое изображение в интерферометре дает полосы со средним расстоянием около 1650 Å. Используя это значение для y и другие известные параметры прибора ($l=3,48$ см; $d=1,8$ Å; $\theta=2,7 \cdot 10^{-2}$), получаем для максимальной разности хода значение $\Delta=276$ Å, т. е. примерно 5800 длин волн (при 60 кВ $\lambda_0=0,048$ Å).

Основным недостатком дифракционного интерферометра является очень низкая интенсивность наблюдаемых полос вследствие того, что полезно используется только малая часть первичного электронного пучка. Поэтому наблюдать полосы на экране почти невозможно, а для фотографирования на пластинку требуется слишком большая экспозиция (порядка нескольких минут). Кроме того, слишком велик уровень фона, вызванного попаданием на пластинку неупруго рассеянных электронов. Если кристалл недостаточно однороден (например, имеет складки), уровень фона повышается. Несмотря на эти трудности, на одной пластинке

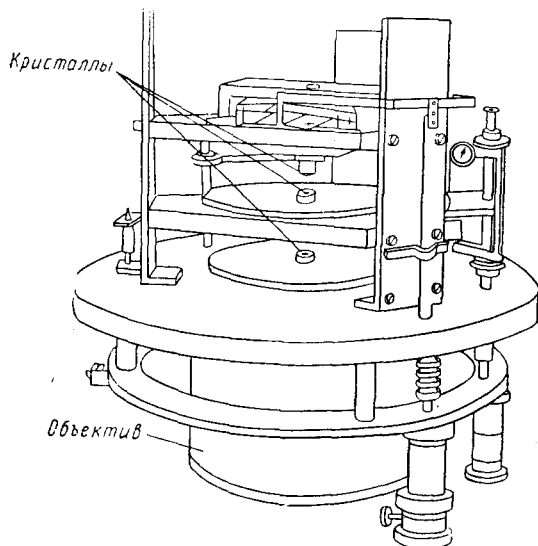


Рис. 14. Приспособление для размещения и юстировки трех кристаллов.

удалось наблюдать до 154 полос интерференции со средним расстоянием между ними 1050 Å.

Второй недостаток этого типа прибора — наличие дисперсии электронных пучков, вводимой кристаллическими пленками. Эта дисперсия усложняет проблему интерпретации когерентных картин, особенно при изучении спектра энергии первичных пучков, создаваемых различными источниками. Таким образом этот интерферометр не может быть использован для интерференционной спектроскопии.

6. БИПРИЗМА ФРЕНЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЛН

Переходим к описанию второго типа электронного интерферометра, свободного от указанных выше недостатков и основанного на расщеплении электронного пучка и воссоединении получаемых когерентных пучков

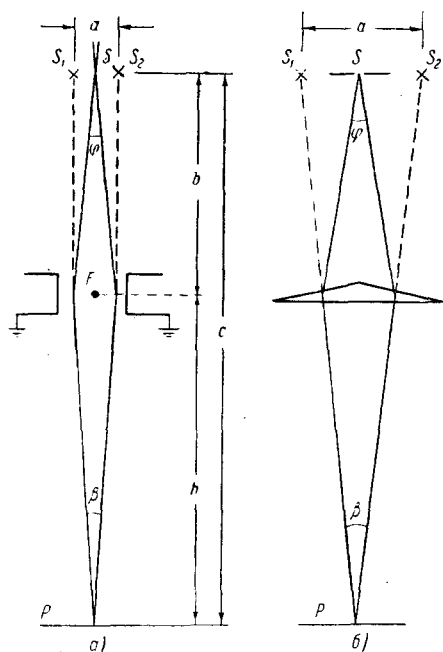


Рис. 15. Схема электростатической бипризмы (а) и ее светооптическая аналогия (б).

при помощи электрических потенциальных полей (расщепление волнового фронта).

В этом случае применяется электронно-оптическая система, которая по своему действию на электронные лучи напоминает бипризму Френеля для света. Электронная бипризма была осуществлена Мелленштедтом и Джеромом¹⁴ и в несколько другом варианте Фаже и Фером¹².

Схема электронной бипризмы Френеля вместе со светооптической аналогией показана на рис. 15. Электроны, создаваемые источником малых размеров S , проходят через двойной конденсатор, состоящий из двух заземленных электродов и тонкой металлической нити F , расположенной в середине разделяющего их зазора. При положительном потенциале на нити относительно заземленных электродов электроны отклоняются так, что образуется два когерентных пучка, как бы исходящих из двух виртуальных источников S_1 и S_2 . При соединении в плоскости P

эти пучки интерферируют друг с другом, образуя в этой плоскости систему интерференционных полос, параллельных нити.

При практическом осуществлении электронной бипризмы имеются принципиальные трудности, вызванные очень малой длиной электронной волны.

Из теории светооптических интерферометров²² известно, что ширина полос интерференции (расстояние между соседними полосами), возникающих при использовании призмы, определяется для малых углов из следующего выражения:

$$y = \frac{\lambda}{\beta} = \lambda \frac{c}{a}, \quad (5)$$

где λ — длина волны света, β — угол между интерферирующими лучами,

s —расстояние от источника до плоскости наблюдения, a —расстояние между виртуальными источниками.

На размер источника так же налагается условие, ибо различные точки протяженного источника являются некогерентными; ширина источника не должна превышать величины

$$e = \frac{\lambda}{\varphi}, \quad (6)$$

где φ —апертура пучка, падающего на бипризму.

Учитывая, что длина волны электронов, например, для ускоряющего напряжения 50 кэВ ($\lambda_e = 0,05 \text{ \AA}$) в 100 000 раз меньше длины волны видимого света, из этих соотношений следует, что угол β между интерферирующими электронными лучами, а также и размер источника должны быть во столько же раз меньше, чем для света.

Для наблюдения интерференционных полос необходимо, чтобы расстояние между полосами было больше разрешающей силы прибора, т. е. $y > \delta$, где δ —разрешаемое расстояние. Тогда из выражения (5) можно определить наибольший угол между двумя интерферирующими лучами, при котором возможно наблюдать интерференционные полосы:

$$\beta = \frac{\lambda}{y} < \frac{\lambda}{\delta}. \quad (7)$$

Например для электронов, ускоренных напряжением 50 кэВ ($\lambda_e = 0,05 \text{ \AA}$), $\beta < \frac{5 \cdot 10^{-2}}{\delta}$, где δ —измерено в ангстремах.

Но, с другой стороны, ширина полос y должна быть больше ширины источника e . Поэтому

$$\beta = \frac{\lambda}{y} < \frac{\lambda}{e}. \quad (8)$$

В опытах Мелленштедта и Дюкера источник электронов (уменьшенное изображение «кроссовера») имел ширину 500 \AA . Поэтому для 50 кэВ угол должен быть

$$\beta < \frac{0,05 \text{ \AA}}{500 \text{ \AA}} = 10^{-4} \text{ радиан.}$$

Это означает, что для расстояния между бипризмой и плоскостью наблюдения, равного $h = 20 \text{ см}$, нить бипризмы должна иметь радиус не больше

$$r = \frac{\beta}{2} h = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 10^{-3} \text{ см.}$$

Техническая реализация таких условий эксперимента представляет очень сложную задачу. В экспериментах Мелленштедта и Дюкера использовалась кварцевая нить диаметром 2 м , покрытая золотом. Для отклонения электронов на эту нить подается положительное напряжение в несколько вольт относительно двух заземленных электродов, находящихся от нее на расстоянии 2 мм . В качестве малого источника электронов S используется линейный электронный зонд, образуемый посредством двухкратного уменьшения реального источника, вернее «кроссовера» пучка, с помощью двух электростатических цилиндрических линз I и II (рис. 16).

Так как диаметр «кроссовера» составляет примерно 50 м , то при тысячекратном уменьшении получается линейный зонд шириной 500 \AA и длиной несколько миллиметров. Такой зонд и является «входной щелью» для бипризмы. Несмотря на свои малые размеры, электронный источник

должен иметь достаточно высокую интенсивность, для того чтобы интерференционная картина после соответствующего увеличения могла наблюдаться на экране. Увеличение интерференционных полос осуществляется с помощью увеличивающей цилиндрической линзы *I*. Вторая увеличивающая цилиндрическая линза *II* предназначена для увеличения в направлении, совпадающем с направлением полос. Это последнее увеличение вызвано тем, что нить неоднородна по своей длине.

Возникающая на экране интерференционная картина наблюдается при помощи светосильной луны. Интенсивность конечной картины достаточна для того, чтобы визуально наблюдать ее и фотографировать с обычной для

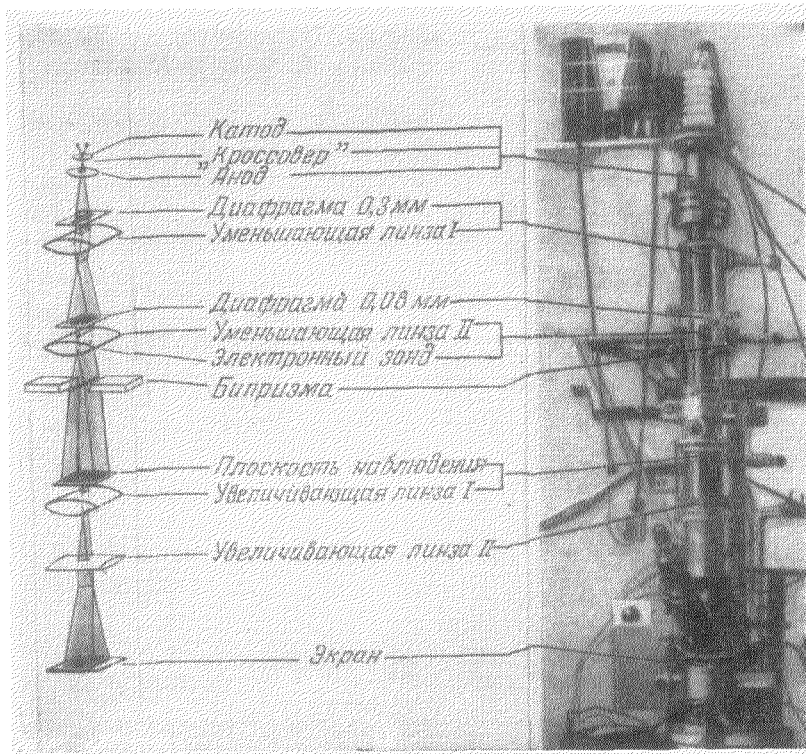


Рис. 16. Схема интерферометра с электростатической бипризмой.

электронного микроскопа экспозицией порядка 1 сек. В этом большое преимущество этого типа интерферометра перед описанным выше дифракционным интерферометром.

Рассмотрим кратко результаты экспериментов, проведенных с электронной бипризмой. Если нить бипризмы вначале заземлить, то отклонения электронных лучей не будет, и на экране образуется теневое изображение нити (рис. 17). С обеих сторон границ тени видно примерно по 12 дифракционных полос Френеля. При большой экспозиции (~ 30 сек) такие полосы можно заметить и в области тени. При наложении на нить положительного потенциала, вследствие отклонения электронов, левая половина картины (рис. 17) смещается вправо, а правая—влево. Дифракционные полосы налагаются друг на друга. Процесс наложения полос при увеличении потенциала нити от 0 до 7 в демонстрируется на рис. 18. Как видно, в области наложения обеих половин картины появляются яркие интерференционные полосы (рис. 18, *г—ж*), дифракционные же полосы Френеля

моделируют интенсивность интерференционной картины. С увеличением потенциала нити область интерференции расширяется, но расстояние между полосами уменьшается.

Что касается распределения интенсивности в интерференционной картине, то пока не удалось экспериментально показать, что она совпадает с теоретическим распределением

$$I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi \Delta}{\lambda} \right),$$

где I_0 — интенсивность интерферирующих лучей и Δ — разность хода между ними.

Этому мешает модуляция картины интерференции дифракционными полосами от краев нити и недостаточная разрешающая способность фотоэмульсии, отчетливо выступающая на микрофотограммах интерференционной картины (рис. 19).

Максимальное число интерференционных полос (отсчитанное от нулевой полосы) позволяет определить когерентную длину электронно-волнового пучка (см. выше). Нулевая полоса соответствует разности хода обоих лучей, равной нулю. Она сохраняется для всех длин волн, т. е. в случае электронов не зависит от их скорости (положение нулевой полосы легко определяется, если подать небольшое переменное напряжение либо на катод, либо на бипризму).

В опытах с бипризмой Мелленштедта и Дюкера максимальное число N интерференционных полос при ускоряющем напряжении 19,4 кВ ($\lambda_0 = 0,075 \text{ \AA}$) было равно 300, т. е. значительно меньше, чем число, определяемое соотношением (1). Следовательно, когерентная длина равна:

$$L_{\text{ког}} = N \lambda_0 = 300 \cdot 0,075 \text{ \AA} = 22,5 \text{ \AA}.$$

Однако это значение для когерентной длины нельзя считать точным, ибо максимальное число полос определено, по-видимому, неуверенно. Как указывают авторы, интерференционная картина содержит полос больше чем 300, но они уже не разрешаются на изображении. С уменьшением размера источника можно ожидать получение большего числа полос.

Таким образом, экспериментальное определение когерентной длины представляет пока трудную задачу.

Интересно отметить, что ширина интерференционной картины, по которой отчетливо наблюдаются полосы, составляет около 40 μ . Так как бипризма заставляет налагаться две половины начального пучка, то ширина когерентного волнового фронта должна быть по крайней мере $\sim 80 \mu$.

Отклоняющее действие поля бипризмы, знание которого существенно, например, для того чтобы определить, как изменяется волновой фронт при прохождении через бипризму, исследовалось следующим образом. Полученная путем экспериментов в электрической ванне система эквипотенциальных линий (рис. 20) показывает, что поле вблизи нити бипризмы имеет аксиально-симметричный характер независимо от формы заземленных электродов. Распределение потенциала в области между эквипотенциалами 30 и 100 (потенциал нити относительно заземленных электро-

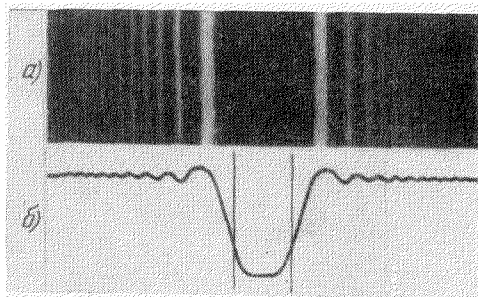


Рис. 17. Теневое изображение нити бипризмы (а) вместе с фотометрической кривой дифракционных полос (б). Увеличение 1670.

дов принимался за 100) соответствует распределению потенциала в цилиндрическом конденсаторе:

$$\varphi(R) = U_f \frac{\ln \frac{R}{R_a}}{\ln \frac{r}{R_a}}, \quad (9)$$

где U_f — потенциал нити, r — радиус нити, R_a — радиус эквипотенциали

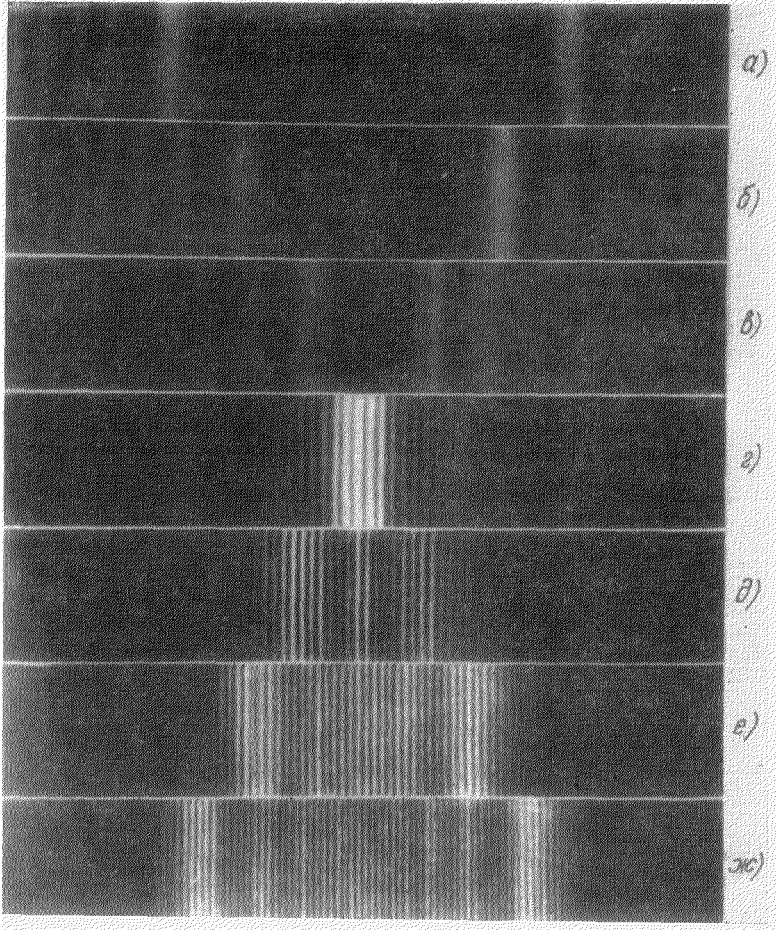


Рис. 18. Возникновение интерференционных полос при увеличении положительного потенциала нити бипризмы: а) $U_f=0$, б) $U_f=1,5$ в, в) $U_f=2,8$ в, г) $U_f=4$ в, д) $U_f=5$ в, е) $U_f=5,8$ в, ж) $U_f=7$ в. Ускоряющее напряжение = 19,4 кв. Увеличение 2600 (электронно-оптическое с помощью проекционной линзы 167 и светооптическое 15,5).

$\varphi = 30$. $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ — расстояние от оси нити до произвольной точки. Напряженность поля в произвольной точке R определяется из следующего выражения:

$$E(R) = -\text{grad } \varphi(R) = \frac{U_f}{\ln \frac{r}{R_a}} \frac{R_a}{R},$$

т. е.

$$E(R) = k \frac{U_f}{R}.$$

Отклонение электронов, проходящих вблизи нити, с одной стороны, пропорционально x -компоненте напряженности электрического поля (см. рис. 20) и, с другой стороны, пропорционально отрезку пути, на котором это поле действует. Если выбрать произвольный сектор A (рис. 21), то в этом секторе действующая компонента E_x убывает как $\frac{1}{R}$, но отрезок пути $z_1 - z_2$ в этом секторе увеличивается пропорционально R . Таким

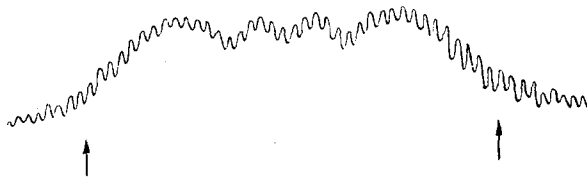


Рис. 19. Микрофотограмма интерференционных полос; стрелки указывают границы тени нити. Расстояния между полосами в плоскости наблюдения 3300 \AA .

образом, в этом секторе угол отклонения электронов постоянный, независимо от расстояния от оси нити. Эти рассуждения можно повторить для каждого сектора.

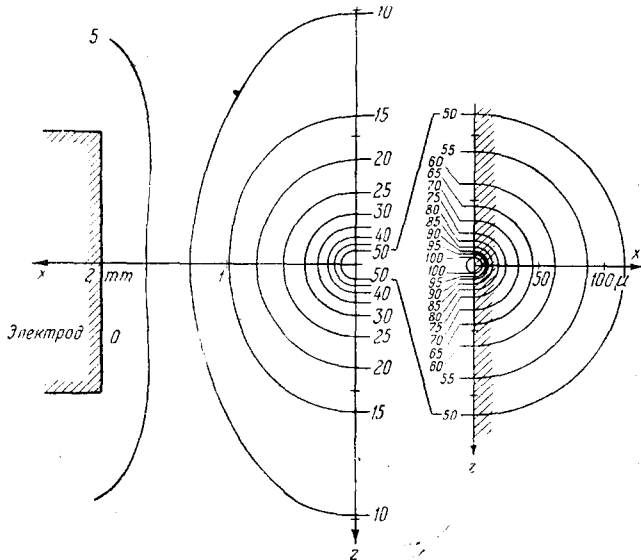


Рис. 20. Эквипотенциальные линии поля нити бипризмы, полученные с помощью электролитической ванны. Затрихованная область — максимально используемая рабочая область бипризмы. Электроны движутся вдоль оси z .

Одинаковое отклонение лучей вблизи нити подтверждается непосредственным наблюдением. Если бипризму с заземленной нитью поместить между объективом и проективом электронного микроскопа, то на обычном электронно-микроскопическом изображении появляется тень нити (рис. 22, а). При наложении положительного напряжения на нить обе половины изображения смещаются влево и вправо относительно тени нити (рис. 22, б). Из сравнения рис. 22, а и рис. 22, б видно, что отдельные точки на различном расстоянии от тени нити вплоть до расстояния 100μ отклоняются на одну и ту же величину (линии, соединяющие эти точки на

рисунках *a* и *б* параллельны). Таким образом, все точки волнового фронта на расстоянии от оси нити, по крайней мере, до 100μ отклоняются бипризмой на одну и ту же величину. Это должно привести к тому, что расстояние

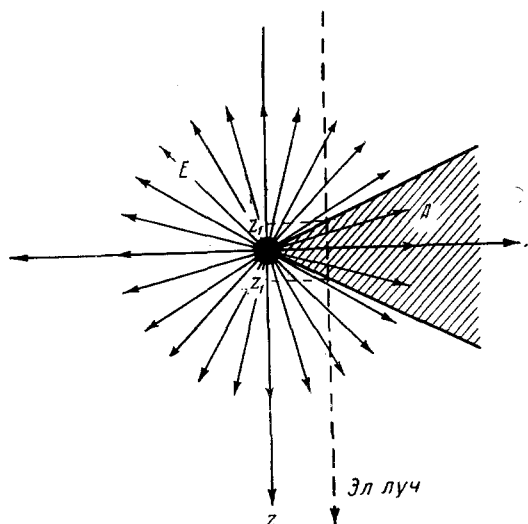


Рис. 21. К отклоняющему действию поля бипризмы на электроны.

то длина правого луча изменяется (пунктирная линия). Чтобы при этом оставить неизменным длину левого луча, необходимо и на левый электрод подать добавочное напряжение U_e .

между интерференционными полосами на всем протяжении картины должно быть одинаковым, что и наблюдалось на самом деле.

Было показано также, что угол отклонения электронов линейно возрастает с увеличением потенциала нити U_f .

Если изменять напряжения левого и правого электродов относительно нити, то можно менять отклонения левого и правого когерентных лучей. При этом величину отклонения для них можно сделать разной и тем самым изменить разность хода в каждой точке наблюдения. Если, например, к правому электроду приложить добавочное напряжение U_r , как показано на рис. 23,

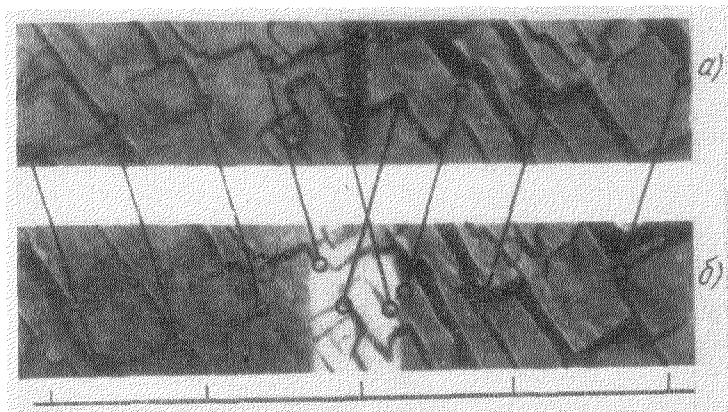


Рис. 22. Экспериментальное доказательство одинакового отклонения всех точек волнового фронта бипризмой (линии, соединяющие одинаковые точки на двух снимках, параллельны).

На рис. 24 показан сдвиг фаз, соответствующий $\lambda/2$, при добавочном напряжении на правом электроде $U_r = 0,3 \text{ в}$.

7. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЛН

Поскольку интерференция электронных волн еще недостаточно изучена, она не нашла пока широкого практического применения. По существу проведены только первые эксперименты по обнаружению и исследованию явлений интерференции электронных волн и построены первые электронные интерферометры, которые далеко не совершенны. Однако уже сейчас можно указать на большое число возможных применений электронной интерференции.

а) Определение длины электронной волны

До сих пор для экспериментального определения длины электронной волны использовались опыты по дифракции электронов в кристаллах по известным постоянным кристаллической решетки, которые, в свою очередь, определялись из дифракции рентгеновских лучей.

Явления интерференции позволяют непосредственно определить длину волны и еще раз подтвердить соотношение де Бройля.

Длина волны может быть определена, например, из опытов с бипризмой, используя соотношение $y = \lambda \frac{c}{a}$. Расстояние y между полосами определяется непосредственно из интерференционной картины, расстояние между

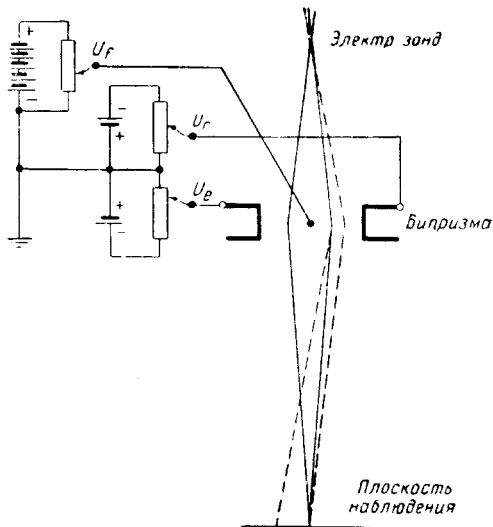


Рис. 23. Схема изменения разности фаз между когерентными лучами в бипризме.

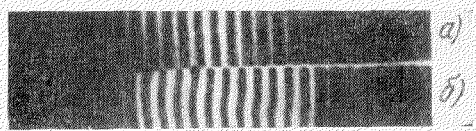


Рис. 24. Смещение полос на $\lambda/2$ при изменении потенциала правого электрода бипризмы (U_r) на 0,3 в: а) $U_r = 0$, б) $U_r = 0,3$ в.

и граница тени смещается на величину δx . Из рис. 25 видно, что

$$\frac{\delta x - \frac{d}{2} + r}{c - b} = \frac{\delta x - \frac{d}{2} + \frac{a}{2}}{c},$$

откуда

$$a = 2 \frac{b}{c - b} \delta x. \tag{10}$$

Следовательно, для длины волны λ получается выражение

$$\lambda = \frac{2b}{(c - b)c} y \delta x, \tag{11}$$

где y и δx определяются из фотометрической кривой.

расстояние между электронным зондом и плоскостью наблюдения с известно, расстояние же a между виртуальными источниками определяется из геометрических соображений, изложенных ниже.

На рис. 25 $d = AB$ — ширина тени заземленной нити бипризмы. При положительном напряжении на нити лучи отклоняются на угол γ

Так как граница тени нити на изображении обозначена не резко, на практике измеряют смещение любой дифракционной полосы, которое вследствие одинаковости отклонения лучей равно смещению границы тени δx . Длина волны, определяемая этим способом, с точностью 0,5% совпадает с рассчитанным по формуле де Бройля значением.

б) Определение внутренних потенциалов

В световом интерферометре при помещении на пути одного из лучей вещества с показателем преломления n оптическая длина луча изменяется и по сдвигу фаз лучей можно определить показатель преломления. Ана-

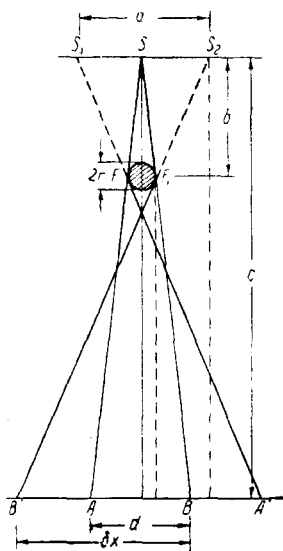


Рис. 25. К определению расстояния a между виртуальными источниками.

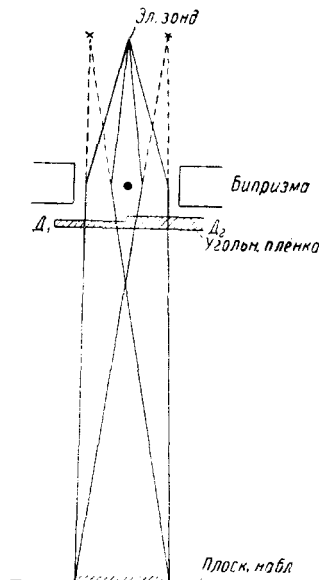


Рис. 26. К определению внутреннего потенциала угольной пленки.

логично этому, если на пути электронного луча поместить тонкий слой какого-либо вещества, то изменение скорости электронов под действием внутреннего потенциала приводит к сдвигу полос интерференции. По этому сдвигу можно определить величину среднего внутреннего потенциала.

Мелленштедт и Келлер²³ определили значение внутреннего потенциала для углерода. Для этого на пути электронных лучей ниже бипризмы была внесена пленка углерода. В горизонтальной средней полосе толщина пленки была D_1 (см. рис. 26) и оба пучка проходили одинаковый путь (следовательно, положение интерференционных полос было такое же, как в отсутствие объекта) выше и ниже средней полосы. В области левого пучка пленка имела толщину D_1 , а в области правого D_2 . При этом пленка располагалась так, чтобы граница раздела двух участков различной толщины лежала в показанной пунктиром на рис. 26 области тени нити. Следовательно, между левым и правым пучками возникает дополнительная разность хода, и полосы смещаются. На рис. 27 показаны смещения полос для двух положений пленки. Из смещения полос можно заключить, что электроны в пленке имеют большую скорость, чем в вакууме. Следовательно, средний внутренний потенциал в пленке положительный.

Величина его определяется из следующих данных. Действующая толщина для сдвига фазы при $D_1 = 40 \text{ \AA}$ и $D_2 = 160 \text{ \AA}$ равна $D = D_2 - D_1 = 120 \text{ \AA}$ (толщина пленки определяется из светооптической прозрачности или методами оптической интерференции). Если λ_0 — длина

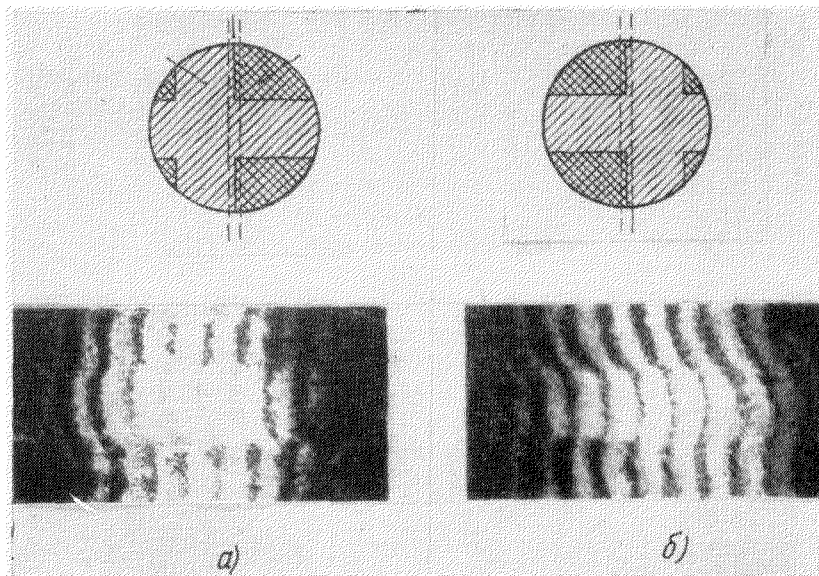


Рис. 27. Смещение полос интерференции, вызванное прохождением лучей через пленки различной толщины. а) Толстая пленка D_r правее нити бипризмы, б) толстая пленка D , левее нити бипризмы.

волны в вакууме, а λ_c — в среде, то фазовый сдвиг вследствие прохождения волны сквозь пленку будет равен

$$\Delta\alpha = 2\pi \left(\frac{D}{\lambda_c} - \frac{D}{\lambda_0} \right) \approx -2\pi D \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}. \quad (12)$$

Если учесть, что $\lambda = \sqrt{\frac{150}{U}} \text{ \AA}$ (U в вольтах), то, дифференцируя это выражение, найдем

$$\Delta\lambda = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{150}{U^3}} \Delta U.$$

Откуда

$$\Delta\alpha = \frac{\pi D}{150} \sqrt{\frac{150}{U}} \Delta U = \frac{\pi D}{150} \lambda \Delta U.$$

Так как $\Delta U = \Phi$ есть внутренний потенциал, то

$$\Phi = \frac{150 \Delta\alpha}{\pi D \lambda}. \quad (13)$$

Используя экспериментально найденное значение $\Delta\alpha = \pi$, получим $\Phi = \frac{150}{\lambda D} = (24 \pm 5) \text{ в}$. Это значение выше тех, которые найдены из электронно-дифракционных снимков для графита ($\sim 12 \text{ в}$) и алмаза ($\sim 21 \text{ в}$). Авторы объясняют расхождение местными неоднородностями пленки.

в) Использование полос Френеля для исследования астигматизма электронных линз

Как было отмечено выше, полосы Френеля, возникающие около изображения края объекта в электронном микроскопе (контурные явления), успешно использовались для исследования астигматизма электронных линз⁵. Астигматизм возникает тогда, когда нарушается аксиальная симметрия поля линзы. В этом случае симметрия полос Френеля около края объекта также нарушается; они могут даже исчезать в каком-либо направлении. Для исправления астигматизма обычно в оптическую систему вводятся несимметричные относительно оси электрические или магнитные поля (стигматоры). Эффект исправления астигматизма контролируется по изменению симметрии френелевых полос. Появление симметричных одинаковых полос вокруг замкнутого края объекта (например коллоидной частицы) свидетельствует об исправлении астигматизма. Этот метод сейчас широко применяется в электронной микроскопии.

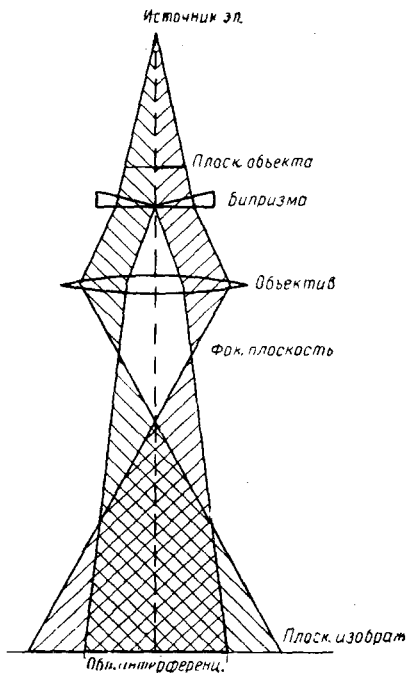


Рис. 28. Принцип действия электронного интерференционного микроскопа.

г) Электронная интерференционная микроскопия

Картина интерференции, а именно положение интерференционных полос на различных участках электронно-микроскопического изображения объекта позволяет получить дополнительные сведения о микроструктуре последнего.

Для получения когерентных лучей используется расщепление пучков либо самими объектами, либо с помощью специально введенной электростатической бипризмы.

Первый случай, который был достаточно полно описан выше, относится к изображению кристаллических объектов в обычной схеме электронного микроскопа. Интерференционные картины, накладываемые на изображение, позволяют определять форму и размеры неоднородностей в кристаллах. Правда, пока что все эксперименты, связанные с интерференцией в кристаллических объектах, были посвящены больше исследованиям самого явления, нежели его практическому применению к исследованию различных структур объекта.

Первые попытки применения для этих целей специального расщепителя электронных пучков (электростатическая бипризма), не связанного с объектом, т. е. попытки осуществления электронного интерференционного микроскопа, были сделаны Молленштедтом и Булем²⁴, а также Фаже и Фером¹⁵.

Принцип действия такого микроскопа был взят из световой оптики. Он ясен из рис. 28. Если между плоскостью объекта и объективом поместить рассеивающую бипризму, то в фокальной плоскости объектива образуются два когерентных изображения источника (рассеивающую бипризму можно получить, если на нить описанного выше устройства

подать отрицательный потенциал относительно заземленных электродов). В плоскости изображения объектива вследствие наложения когерентных лучей наблюдается система интерференционных полос, которая увеличивается затем проектором. Если внести объект (на рис. 28 для простоты показан однородный объект, занимающий половину отображаемого поля), то вследствие возникающего сдвига фазы при прохождении электронов через объект интерференционные полосы сдвигаются. Сдвиг полос определяет оптическую толщину объекта.

Неоднородности объекта, даже очень мелкие, сказываются на положении и форме интерференционных полос.

На рис. 29 показано изображение пленки углерода с интерференционной картиной, наложенной на изображение. Здесь хорошо видны искажения полос интерференции при изменении толщины. Другие снимки, например изображения кристаллов U_2O_3 на угольной пленке, показывают, что различия в деталях объекта четко обнаруживаются на интерференционной картине.

Важно отметить, что при прохождении электронов через вещество, как показывают полученные снимки, сохраняется когерентность электронных волн; этот вопрос теоретически был рассмотрен Габором¹⁸. Что касается влияния электронных линз, особенно их аберраций, на когерентность, то этот вопрос пока изучен недостаточно.

Из других возможных применений явлений интерференции электронных волн укажем на измерение градиентов электрических и магнитных микрополей и изучение структуры электронных эмиттеров (интерференционная электронная спектроскопия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные здесь опыты по электронной интерференции позволяют сделать следующие выводы:

1. Показана возможность экспериментального осуществления интерференции электронных волн в различных условиях. Длина волны электрона, определяемая из экспериментов по интерференции, совпадает с определенной из соотношения де Бройля с точностью 0,5%.

2. В основу проведения экспериментов по электронной интерференции была положена светооптическая аналогия. Первые попытки осуществления опытов, подобных светооптическим, увенчались успехом.

Показана экспериментальная возможность осуществления классических опытов Юнга и Френеля для электронных волн. Однако размеры когерентных источников, расстояния между ними и углы между интерферирующими лучами в экспериментах с электронами должны быть уменьшены во столько раз, во сколько длина волны света больше длины электронной волны. Это приводит к значительным трудностям экспериментального осуществления электронной интерференции. Только точная техника электронной микроскопии (большая механическая точность

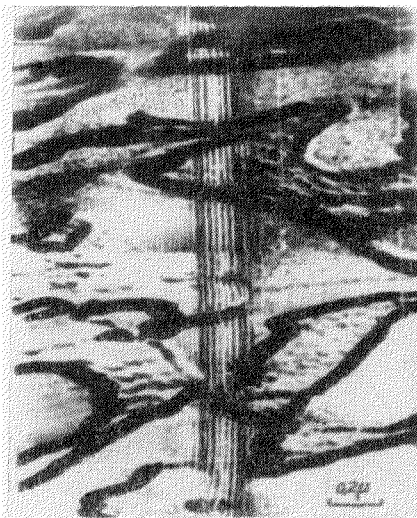


Рис. 29. Электронно-микроскопическое изображение с наложенной на него картиной интерференции.

и высокая стабилизация напряжения) позволила осуществить эти эксперименты.

3. Вопрос когерентности электронных волн изучен еще недостаточно. Что касается когерентной длины электронно-волнового пучка, то, как показывают эксперименты, она достаточна для того, чтобы наблюдать несколько сот интерференционных полос. А геометрическая теория²¹ дифракционного интерферометра показывает, что можно осуществить интерференцию при разности хода в несколько тысяч длин волн.

4. Опыты по электронной интерференции показали возможность применения явлений электронной интерференции для практических целей. Уже созданы первые модели электронных интерферометров двух типов: интерферометр, использующий дифракцию электронов в тонких кристаллических слоях, и интерферометр с бипризмой Френеля. А на базе последнего создаются первые модели электронного интерференционного микроскопа. Несмотря на их несовершенство, они уже применяются для практических целей.

Описанные опыты по интерференции электронных волн и теоретические работы по этому вопросу, наряду с достаточно хорошо изученным явлением дифракции электронов в кристаллах, являются первыми попытками развития волновой электронной оптики.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. L. de Broglie, *Phil. Mag.* **47**, 466 (1924).
2. C. Davisson and L. Germer, *Phys. Rev.* **30**, 707 (1927).
3. H. Busch, *Ann. d. Phys.* **81**, 974 (1926); *Arch. f. Elektrotechn.* **18**, 583 (1927).
4. H. Boersch, *Naturwiss.* **28**, 711 (1940); *Physik Zeitschr.* **44**, 202 (1943).
5. J. Hillier and E. Ramberg, *J. Appl. Phys.* **18**, 48 (1947).
6. T. Mitsuishi, H. Nagasaki and Uyeda, *Proc. Japan. Acad.* **27**, №2 (1951).
7. G. Möllenstedt, *Optik* **10**, 72 (1953).
8. O. Rang, *Optik* **10**, 90 (1953).
9. O. Rang, *Zeits. Phys.* **136**, 464 (1953).
10. L. Marton, *Phys. Rev.* **85**, 1057 (1952).
11. L. Marton, J. Simpson and J. Suddeth, *Phys. Rev.* **90**, 490 (1953); *Rev. Sci. Instr.* **25**, 1099 (1954).
12. G. Möllenstedt und H. Düker, *Naturwiss.* **42**, 41 (1955).
13. H. Düker, *Zeits. Naturforsch.* **10a**, 256 (1955).
14. G. Möllenstedt und H. Düker, *Z. Phys.* **145**, 377 (1956).
15. J. Faget, C. Fert, *Cahiers Phys.*, № 83, 285 (1957).
16. Г. С. Ландсберг, *Оптика*. Гостехиздат 1954.
17. Л. М. Биберман, Н. Г. Сушкини В. А. Фабрикант, *ДАН СССР*, т. XVI, 185 (1949).
18. D. Gabor, *Rev. Mod. Phys.* **28**, 260 (1956).
19. З. Г. Пинскер, *Дифракция электронов*, изд. АН СССР, 1949.
20. C. Bogus, *Carnegie Inst. Washington. Publ.* **149**, часть I (1941), часть II (1942), часть III (1944).
21. J. Simpson, *Rev. Sci. Instr.* **25**, 1105 (1954).
22. А. Н. Захарьевский, *Интерферометры*, Оборониздат, 1952.
23. G. Möllenstedt und M. Keller, *Zeits. f. Phys.* **148**, 34 (1957).
24. G. Möllenstedt und R. Buhl, *Physikalische Blätter* **13**, 357 (1957).