УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

новые приборы и методы измерений

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ И ФАЗОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

В. И. Милютин

1. ВВЕДЕНИЕ

После того как были осуществлены опыты по интерференции электронных волн (см. описание их в работе¹), большое внимание стало уделяться практическому использованию этого явления. Сделаны попытки создать первые образцы электронных интерферометров. В одних случаях используется интерференция электронов при расщеплении когерентных электронных пучков тонкими слоями монокристаллов², в других — расщепление пучков внешним электрическим полем³. Особенно большие перспективы наметились в применении интерференции электронов для целей электронной микроскопии. Собственно говоря, первые наблюдения интерференции электронов были получены при исследованиях в электронном микроскопе. Достаточно хорошо изучены интерференционные полосы Френеля, возникающие вблизи границ микрообъектов, наблюдаемых в электронном микроскопе при их недофокусировке или перефокусировке. Изучены также многочисленные интерференционные эффекты, появляющиеся при наблюдении в электронном микроскопе деформированных монокристаллических пленок. Двухлучевая интерференция электронов типа Френеля в световой оптике была получена также в электронном микроскопе при введении в него специальной электронной бипризмы. Правда, в этом случае электронный микроскоп уже не выполняет своих функций микроскопа, а просто используется как прецизионный электронно-лучевой прибор. В качестве бипризмы используется отклоняющее электрическое поле. возникающее между тонкой проводящей нитью и двумя плоско-параллельными пластинками. В качестве источника электронов используется электронный зонд очень малых размеров, который образуется путем двухкратного уменьшения «кроссовера» пучка в стабилизированной электронной пушке. Проходя через отклоняющее поле бипризмы, электронный пучок расщепляется (нить бипризмы может иметь как положительный, так и отрицательный знак), и при дальнейшем наложении пучков друг на друга возникает интерференционная картина, подобная той, которая возникает при прохождении света через стеклянную бипризму. Когерентность интерферирующих пучков, как показал опыт, обеспечивается малым размером источника, а также монохроматичностью и стабильностью во времени создаваемого им электронного пучка.

Нужно отметить, что эти требования к пучку, а также малые углы между интерферирующими пучками, необходимые для наблюдения картины интерференции, очень усложняют практическое осуществление ¹/₂ 11 уфн, т. LXXIV, вып. 3 опытов по интерференции электронов. Однако высокая техника электронномикроскопических исследований позволяет осуществлять такие опыты, а затем применить это явление в практических целях.

Одним из первых таких применений является определение внутренних потенциалов различных твердых тел по фазовым изменениям проходящих через них когерентных электронных пучков⁴. При этом были обнаружены заметные фазовые изменения пучков, значительно бо́льшие, чем для света⁵. Большие фазовые изменения электронных волн при прохождении их через тонкие препараты, естественно, привлекшие внимание специалистов в области электронной микроскопии, позволяют успешно использовать интерференцию электронов для более глубокого изучения микроструктуры и состава объектов, а также улучшить контраст изображения в электронном микроскопе.

В этой статье будут кратко описаны первые попытки сочетания электронно-микроскопического изображения объекта с интерференцией прошедших через него электронов (интерференционный электронный микроскоп), а также опыты по осуществлению фазового контраста в электронном микроскопе.

2. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

Идея сочетания изображения объекта с интерференцией прошедших через него воли не нова. В световой оптике давно уже были созданы при-



Рис. 1. Схема микроинтерферометра Линника.

боры для этих целей. Для исследования отражающих объектов В. П. Линником 6 был построен прибор, известный в литературе как «микроинтерферометр Линника». Для изучения прозрачных тел подобный прибор был создан В. А. Савиным 7. В микроинтерферометре Линника (рис. 1) лучи, отраженные от исследуемого объекта S₁ и дающие его изображение в фокальной плоскости S' окуляра микроскопа, в этой же плоскости интерферируют с частью того же пучка, отраженной совершенной оптической поверхностью S₂. Пластинка П служит для расщепления света на два когерентных луча 1 и 2. Таким образом, в фокальной плоскости окуляра на изображение объекта накладывается интерференционная картина, причем полосы интерференции деформируются в соответствии с микропрофилем объекта. Этот прибор применялся, например, для исследования качества обработки поверхностей различных тел.

Прибор, в котором одновременно наблюдается микроскопическое изобра-

жение объекта и деформированная им картина интерференции, называется обычно интерференционного микроскопа для электронных волн стало возможным после того, как была разработана электронная бипризма и изучены основные особенности интерференции электронов. Первая попытка построения электронного интерференционного микроскопа была сделана в лаборатории Мёлленштедта⁸⁻¹⁰, в которой ранее был создан один из вариантов электронной бипризмы. Для этих целей такая бипризма помещается на пути электронного пучка в электронном микроскопе. Она располагается между объектом и объективом и производит необходимое для интерференции когерентное расщепление пучка (рис. 2, *a*).



Рис. 2. Возможные схемы интерференционного электронного микроскопа.

Возможны и другие схемы расположения бипризмы. Ее можно, например, поместить между объективом и плоскостью изображения (рис. 2, б). В последнем случае получаются большие увеличения изображения.

Когерентный пучок проходит плоскость объекта в двух смежных областях (на рис. 2 первая область показана жирной чертой, вторая тонкой). Бипризма расщепляет пучок электронов на два пучка (см., например, рис. 2, *a*), которые вновь сводятся вместе объективом и интерферируют друг с другом в области, показанной двойной штриховкой. В плоскости изображения образуются интерференционные полосы, параллельные нити бипризмы. Когерентность лучей при прохождении через объект не нарушается. Однако благодаря сдвигу фаз, вызванному объектом, полосы интерференции в соответствующих местах изображения смещаются. Таким образом, в плоскости изображения можно одновременно наблюдать изображение объекта и измененную объектом интерференционную картину, которая дает дополнительные сведения о микроструктуре объекта. Даже в том случае, когда контраст изображения недостаточен для рассматривания деталей объекта, измененная картина интерференции может дать фазовую информацию об этих деталях.

К электронному интерференционному микроскопу, по сравнению с обычным электронным микроскопом, предъявляются дополнительные требования. Электронная пушка должна иметь повышенную яркость. Для получения узкого электронного зонда (источника для бипризмы), как правило, щелеобразной формы, используется дополнительная цилиндрическая линза. В качестве проекционной системы используются либо аксиально-симметричные проекционные линзы электронного микроскопа,



Рис. 3. Полосы интерференции при отсутствии объекта. Увеличение 12 500×. а) Напряжение на нити бипризмы — 7 с; б) напряжение на нити б призмы — 9,5 с.

кристалла МоО₃. Различная толщина смещение интерференционных полос.

Рис. 4. Интерференционное изображение края угольной пленки. Увеличение 8000×.

либо квадрупольные магнитные линзы, которые повышают интенсивность конечного изображения.

Приведем некоторые снимки, иллюстрирующие работу электронного интерференционного микроскопа и его возможности.

На рис. З показаны картины интерференции, полученные в микроскопе при отсутствии объекта, при двух напряжениях на нити бипризмы. На рис. 4 показано одновременное изображение края угольной пленки и картина интерференции, измененная объектом. Хорошо видно, что в области пленки полосы интерференции смещаются в сторону. Это значит, что при прохожлении пленки фаза электронных волн изменяется. На рис. 5 в поле интерференции видны три кристаллов создает различное



Рис. 5. Интерференционное изображение кристаллов МоО₃. Увеличение 7600×.

Рис. 6 хорошо иллюстрирует влияние контактной разности потенциалов на картину интерференции, получающуюся при прохождении электронов через два соприкасающихся тонких слоя различных металлов. Например, если на отдельных участках слоя меди напылить серебро, то полосы интерференции, соответствующие этим участкам, смещаются вправо (рис. 6, a). При напылении меди на слое серебра полосы смещаются влево (рис. $6, \delta$). По величине смещения полос легко определяется величина контактной разности потенциалов между этими металлами.



Рис. 6. Влияние контактной разности потенциалов на картину интерференции электронов.
 а) Слои (в форме полос) серебра на слое меди; б) слои меди на слое серебра.

Эти и подобные им снимки, получаемые в электронном интерференционном микроскопе, позволяют исследовать микрорельеф объекта, толщину и плотность отдельных деталей. Кроме того, можно получить

дополнительную фазовую информацию об объекте, вызванную различием внутренних потенциалов деталей объекта. Как известно, рассеяние электронов и внутренние потенциалы неодинаково зависят от атомного веса. Таким образом, если напылить два различных металла так, чтобы было одинаковое рассеяние электронов, то по обычному изображению нельзя их отличить друг от друга. Однако смещение полос интерференции при прохождении электронов через них будет различным. Это видно из рис. 7, где показаны две тени кристалла, образуемые при косом напылении золота и алюминия с различных направлений. Полосы интерференции в области этих теней смещаются по-разному — больше для алюминия и меньше для золота.

Следует указать еще на очень интересную работу¹¹, в которой сделана попытка получить интерференционное изображение тонких ферромаг-

нитных слоев. В этом случае в самом объекте (в ферромагнитном слое) создаются условия для когерентного расщепления электронного пучка. Это расщепление происходит на границах областей самопроизвольного намагничения (доменов). Если электронный пучок проходит через две соседние области с противоположным намагничением (для этого слои специально обрабатываются в переменном магнитном поле), то электроны в них отклоняются под действием силы Лоренца в противоположные стороны (рис. 8). Это приводит к образованию вблизи границ доменов

Рис. 7. ¹Интерференционное изображение кристалла, оттененного алюминием и золотом с различных направлений. Увеличение 10 000×. областей схождения (K) или расхождения (D). При выполнении условия когерентности для отклоненных пучков в области схождения происходит



Рис. 8. Отклонение электронов при прохождении ими ферромагнитной фольги.



Рис. 9. Схема для получения интерференционного изображения ферромагнитной фольги.

интерференция электронов, которую можно наблюдать на экране. Правда, интерференции картина несколько искажается электронами, проходящими через переходную область между доменами. Однако показывается, что интенсивность этих электронов в плоскости наблюдения равномерно распределяется в области схождения и составляет от средней интенсивности полос интерференции лишь незначительную часть. Интенсивность интерференционной картины в плоскости конечного изображения при данной скорости электронов зависит от величины магнитного отклонения, ширины переходной области и числа полос.

На рис. 9 показана одна из возможных электронно-оптических схем для получения увеличенного теневого изображения ферромагнитной фольги С наложенной на него интерференционной картиной. Такие изображения показаны на рис. 10. Наряду с микроструктуферромагнитной фольги видны рой светлая (соответствующая области схождения) и темная (соответствующая области расхождения) нолосы. Внутри светлой полосы видна интерференционная картина, которая особенно заметна

на увеличенном изображении (рис. 10, б). С помощью этой картины интерференции можно изучить магнитные свойства доменов; например, пока-



Рис. 10. а) Теневое изображение ферромагнитной пленки; б) то же в увеличенном масштабе.

зывается, что в согласии с теорией¹² магнитное поле доменов непосредственно влияет на фазу проходящих через них электронных волн.

3. ФАЗОВЫЙ КОНТРАСТ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ

Контраст изображения в электронном микроскопе в общем случае определяется поглощением, рассеянием и фазовыми изменениями проходящих через объект электронных волн. Однако, как показывает теория и опыт, поглощение электронов практически отсутствует для большинства исследуемых объектов и главную роль в контрасте изображения играют изменения фазы.

Различные способы улучшения контраста изображения вытекают из общей волновой теории изображения Аббе ¹³. Согласно этой теории механизм образования изображения просвечиваемых объектов представляется следующим. Пучок параллельных когерентных лучей, проходящих через объект, испытывает во всех точках микроструктуры объекта дифракционное рассеяние. Объектив образует в своей фокальной плоскости дифракционное изображение освещающего объект источника (первичное дифракционное изображение), состоящее из нулевого и боковых дифракционных максимумов (рис. 11). В результате интерференции волн, выходящих из первичного дифракционного изображения, возникает вторичное дифракционное изображение, которое является изображением объекта в микросконе. Распределение интенсивности в плоскости изображения и определяет контраст изображения. Как показывается в теории Аббе, характер окончательного изображения полностью определяется свойствами первичного дифракционного изображения, находящегося в пределах отверстия объектива. Полное подобие изображения объекту имеет место только в том случае, когда все максимумы, обусловленные структурой объекта, попадают в объектив. Больше того, на сходство между объектом и изображением и контраст изображения можно воздействовать искусственным вмешательством в первичное изображение.

Если, например, закрыть нулевой максимум (центральное темнопольное освещение) или нулевой и боковые максимумы с одной стороны (косое темнопольное освещение), то контраст изображения в ряде случаев повышается.

Наиболее перспективным для электронной микроскопии является вмешательство в первичное изображение с целью изменения фазы волн, выходящих из нулевого или боковых максимумов. В результате этого меняются условия их интерференции, а следовательно, и распределение



интенсивности в плоскости ко-Это изображения. нечного приводит для фазовых объектов к увеличению контраста. Метод искусственного ИЗМенения фазы волн в нулевом или боковых максимумах с увеличения контраста пелью изображения обычно называется методом фазового контраста. В световой микроскопии OН впервые был предложен Цернике¹⁴.

Рассмотрим сущность этого метода на простом примере прозрачного фазового объекта, представляющего собой малую деталь с показателем преломления n_1 , включенную в однородный слой с показателем преломления n (рис. 12). Пусть данный объект освещается параллельными когерентными лучами. Амплитуды лучей, прошедших через слой и деталь, будут одинаковы, но фазы отличаются на величину

 $\delta = 2\pi \frac{d(n-n_1)}{\lambda} ,$

(1)

Рис. 11. Схема образования изображения в микроскопе по Аббе.

где d — толщина слоя, λ — длина волны проходящих лучей. Уравнения колебаний в точках слоя и детали соответственно будут:

$$y_1 = a \cos \omega t \quad \text{if } y_2 = a \cos (\omega t + \delta). \tag{2}$$

На рис. 12 показаны векторные диаграммы обоих колебаний. Колебание y_2 можно разложить на составляющие, одна из которых совпадает по фазе с y_1 , а другая отличается по фазе от y_1 на угол $\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{2}$. Поэтому написанное выше уравнение для y_2 можно заменить тождественно совпадающим с ним уравнением

$$y_2 = a\cos\omega t + 2a\sin\frac{\delta}{2}\cos\left(\omega t + \frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{2}\right).$$

Эту систему двух волн (т. е. y_1 и y_2), выходящих из слоя и детали, можно заменить системой двух волн, из которых одна выходит из всех точек объекта, включая и деталь, а другая только из детали. Уравнения этих

колебаний имеют вид

$$\overline{y}_1 = a \cos \omega t, \overline{y}_2 = 2a \sin \frac{\delta}{2} \cdot \cos \left(\omega t + \frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{2} \right).$$
 (3)

Лучи \bar{y}_1 , проходя через объект без рассеяния, собираются в фокусе объектива и дают главный максимум (см. рис. 12). Лучи же \bar{y}_2 при прохождении

через малую деталь дифрагируют и дают в фокальной плоскости объектива спектры, по фазе отличающиеся от главного максимума на угол $\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{2}$. В плоскости изображения проходящие лучи \vec{y}_1 дают яркую равномерную освещенность (фон). Освещенность, создаваемая дифрагированными лучами ${ar y}_2$ (она определяется амплитудой $2a \sin \frac{\delta}{2}$ незначительна, так как б, как правило, бывает сравнительно небольшим. Интенсивность изображения детали (например, точки А) определяется интерференцией лучей \bar{y}_1 и \bar{y}_2 , между которыми существует разность фаз $\frac{6}{2} + \frac{\pi}{2}$.

Если в заднюю фокальную плоскость объектива в месте главного максимума поместить фазовую пластинку, которая меняет фазу проходящих лучей на угол Δ (небольшой частью лучей \bar{y}_2 , прошедших через главный максимум, можно пренебречь), то в плоскости изображения (в точке A', рис. 12) будут колебания

$$\begin{aligned} y'_1 &= a\cos\left(\omega t - \Delta\right), \\ \tilde{y}'_2 &= 2a\sin\frac{\delta}{2}\cos\left(\omega t + \frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} (4) \qquad P_{\text{RC}}. \end{aligned}$$



изаблажения

В результате их интерференции амплитуда результирующего колебания в изображении детали:

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos\varphi,\tag{5}$$

где

$$a_1 = a, \quad a_2 = 2a\sin\frac{\delta}{2}, \quad \phi = \frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{2} + \Delta.$$

Значит, можно записать

$$\bar{a}^2 = a^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} + 4a^2 \sin \frac{\delta}{2} \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{2} + \Delta\right), \qquad (6)$$

или

$$\tilde{a}^2 = a^2 \left[1 + 4 \sin \frac{\delta}{2} \left(\sin \frac{\delta}{2} - \sin \left(\frac{\delta}{2} + \Delta \right) \right) \right]$$

Контраст яркости изображения по отношению к фону определяется следующим образом:

$$k = \frac{a^2 - \overline{a^2}}{a^2}$$

12 УФН, т. LXXIV, вып. 3



(где \bar{a} – амплитуда колебаний, определяющая яркость изображения детали, и а – амплитуда, определяющая яркость фона), или

$$k = 4\sin\frac{\delta}{2} \left[\sin\left(\frac{\delta}{2} + \Delta\right) - \sin\frac{\delta}{2} \right].$$
(7)

Видно, что при $\Delta = 0$ k = 0.

Наибольшее значение k получается при $\Delta = \frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} \approx \frac{\pi}{2}$:

$$k_{\max} = 4\sin\frac{\delta}{2} \left(1 - \sin\frac{\delta}{2}\right) \approx 4\sin\frac{\delta}{2} \,. \tag{8}$$

Рассмотренный случай ($\Delta = rac{\pi}{2}$) создает положительный контраст

(т. е. деталь темнее фона) (рис. 13, *a*). Если $\Delta = -\frac{\pi}{2} \left(uлu \frac{3}{2} \pi \right)$, то будет отрицательный контраст $\left(k_{\max} \approx -4 \sin \frac{\delta}{2} \right)$. В этом случае деталь будет ярче фона (рис. 13, *б*).

Мы рассмотрели самый простой случай. Обычно в качестве типовых объектов для теоретического рассмотрения и опытной проверки берут



Рис 13 Получение положительного (a) и отрицательного (б) фазовых контрастов.

фазовую решетку. Процесс образования изображения для нее несколько более сложнее рассмотренного, но сущность метода фазового контраста та же.

В электронном микроскопе возможность получения фазового контраста связана, с одной стороны, с возможностью получения когерентных электронных лучей для освещения объекта и, с другой — с возможностью изготовления подходящей фазовой пластинки, изменяющей разность фаз между лучами, идущими из главного и побочных максимумов.

Что касается первого, то опыты по интерференции показали, электронов что имеется полная возможность получения когерентных электронных лучей. Возможность изготовления фазовой пластинки также имеется. Как упоминалось выше, при прохождении электронов через вещества происходит значительное изменение фазы (например, коллодиевая пленка

толщиной 100 Å вызывает при движении электронов 60 кв смещение фазы порядка $\frac{\pi}{2}$). Правда, при этом нужно иметь в виду, что из-за малой длины волны электронов дифракционные максимумы в первичном изображении

562

находятся очень близко друг к другу и даже могут частично перекрывать друг друга; поэтому, чтобы закрыть только нулевой максимум или только побочные максимумы, фазовая пластинка должна быть очень малых размеров.

Первые опыты по изготовлению подходящих фазовых пластинок и получению фазового контраста изображения в электронном микроскопе были проведены Канайя и др.¹⁵ в Японии. Предварительно авторы теоретически рассмотрели образование фазового контраста для простейшего объекта в форме однородного круглого диска*). Ими было рассчитано



Рис. 14. Различные типы фазовых пластинок. а) Пластинка с отверстием; б) пластинка в форме циска.

распределение интенсивности электронных волн в плоскости изображения, получающейся в результате интерференции проходящих через объект дифрагированных им волн, при наличии фазовой пластинки на пути этих волн. Если фазовая пластинка стоит на пути дифрагированных волн (закрывает боковые максимумы, рис. 14, *a*), то образуется положительный (или темный) контраст, т. е. темный диск на светлом фоне. Если же фазовая пластинка в форме небольшого круглого диска стоит на пути проходящих волн (закрывает главный максимум) (рис. 14, *б*), то образуется отрицательный (светлый) контраст, т. е. светлый диск на темном фоне.

Векторные диаграммы внизу рисунков хорошо поясняют действие фазовых пластинок. В первом случае (отверстие в центре) амплитуда уменьшается по сравнению с фоном. Во втором случае (диск в центре) амплитуда увеличивается по сравнению с фоном. В отсутствие фазовон пластинки градации амплитуды в плоскости изображения незначительны.

^{*)} Теория фазового контраста в электровном микроскопе изложена также в книге В. Глазера «Основы электронной оптики», М., Гостехиздат, 1957.

Значение фазового контраста для центра объекта (так называемый макроконтраст) для обоих случаев было подсчитано из кривой распределения интенсивности в плоскости изображения:

$$k = \frac{I_1 - I_2}{I_2} = \frac{(1 - p)^2 \Delta \delta^2 - p^2 \Delta \delta^2}{(1 - p)^2 \Delta \delta^2} , \qquad (9)$$

где I_1 -интенсивность объекта, I_2 - интенсивность фона, $\Delta \delta$ - изменение



Рис. 15. Изображения окиси молибдена на формваре. а) Без фазовой пластинки; 6) с фазовой пластинкой.

фазы при прохождении электронов через объект, $p = \left(\frac{R_s}{R_a}\right)^2$ (см. рис. 14). Эксперименты, проведенные в электронном микроскопе с фазовой



Рис. 16. Изображение среза сыворотки ячейки околоуппной железы собаки. а) Без фазовой пластинки; 6) с фазовой пластинкой.

пластинкой с отверстиями, показали возможность осуществления фазового электронного микроскопа. Фазовую пластинку в форме диска осуществить гораздо труднее главным образом потому, что электронный пучок фокусируется в задней фокальной плоскости объектива как раз в том месте, где должна находиться фазовая пластинка; его интенсивность может быть в десять раз больше, чем на образце, и поэтому имеют место

явления загрязнения и зарядки пластинки, а то и просто прожигание ее.

В качестве фазовой пластинки используется специальным образом подготовленная коллодиевая или угольная пленка с отверстиями порядка 5—50 мк.

С такими пленками, помещенными в заднюю фокальную плоскость объектива, Канайя¹⁵ были получены первые изображения с фазовым контрастом. На рис. 15 показаны два снимка окиси молибдена на формваре — в одном случае без фазовой пластинки (*a*), в другом — с фазовой пластинкой (*б*). В последнем случае более заметна тонкая структура интерференционных полос кристалла.

На рис. 16 и 17 показаны снимки биологических объектов, для которых фазовый контраст является особенно перспективным. На рис. 16 показано обычное изображение среза сыворотки ячейки околоушной железы собаки (а) и в фазовом контрасте (б). На рис. 17 показано изображение того же объекта, полученное обычным образом (а) и с фазовой пластинкой (б).

Из этих рисунков видно, что при фазовом контрасте изображение является более четким, лучше выявляется микроструктура объекта.

Дальнейшие исследования электронного фазового контраста были произведены недавно во Франции ¹⁶. Для этого использовался магнитный

электронный микроскоп на 100 кв. Фазовая пластинка представляла собой слой смеси бора и углерода толщиной 150 Å, напыленный на коллодиевую пленку. Щелевое отверстие в слое было равно 0,3 мк. Нужная толщина слоя для сдвига фазы на $\frac{\pi}{2}$ контролировалась по смещению полос интер-

ференции в интерференционном электронном микроскопе. Размещалась фазовая пластинка не в фокальной плоскости объектива, а между промежуточной линзой и проектором, в том месте, где образуется второе дифракционное изображение источника. В этом случае расстояния между дифракционными максимумами больше, а плотность электронного тока меньше, и поэтому трудности, о которых указывалось выше, легче преодолеть.



б)

Рис. 17. Изображения того же объекта, что на рис. 16.

 a) Без фазовой пластинки; б) с фазовой пластинкой.

Правда, при этом имеются большие трудности при юстировке отверстия в фазовой пластинке по отношению к изображению источника.



Рис. 18. Изображение пленки коллодия. а) Без фазовой пластинки; б) с фазовой пластинкой.

Иллюстрацией полученного в этом случае фазового контраста является рис. 18, на котором показаны обычное изображение пленки коллодия и изображение с фазовым контрастом.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1. В. И. Милютин, УФН 65, 665 (1958).
 2. L. Marton, J. Simpson and J. Suddeth, Phys. Rev. 90, 420 (1953); Rev. Sci. Instrum. 25, 1099 (1954).
 3. G. Möllenstedt und H. Düker, Z. Phys. 145, 377 (1956).
 4. G. Möllenstedt und M. Keller, Z. Phys. 148, 34 (1957).
 5. E. Ramberg, J. Appl. Phys. 20, 441 (1949).
 6. B. H. Линник, ДАН СССР, нов. сер., № 1 (1933).
 7. B. A. Савин, ДАН СССР, 59, 177 (1949).
 8. G. Möllenstedt, und R.⁴ Buhl, Phys. Bl. 13, 357 (1957).
 9. R.⁶ Buhl, Z. Phys. 155, 395 (1959).
 10. G. Möllenstedt, European Regienal Conference on Electron Microscopy, Delft, 29 August, 1960.
 11. H. Boersch, H. Hamisch, D. Wohleben und K. Grahmann, Z. Phys. 159, 397 (1960).
 12. A haronov and Bohm, Phys. Rev. 115, 485 (1959).
 13. E. A bbe, Schultzes Archiv f. mikr. Anat. 9, 413 (1873).
 14. F. Zernike, Z. techn. Phys. 16, 454 (1935); Physica 9, 686, 974 (1942).
 15. K. Kanaya, H. Kawakatsu and A. Ishikawa, Bull. Electrotechn. Labor. 21, N 11 (1957).
 16. J. Faget, J. Ferre et C. Fert, Compt. rend. 251, 526 (1960).