

Теоретически время экспозиции при работе с таким затвором может быть доведено до  $10^{-8}$  сек. и ограничено лишь яркостью фотографируемого объекта. Авторы, однако, произвели исследование работы затвора в области экспозиций от нескольких секунд до  $2 \cdot 10^{-6}$  сек.

Авторы приходят к выводу, что, несмотря на высокую чувствительность и ряд других достоинств описанного затвора, он ввиду сложности схем и аппаратуры не может конкурировать с затвором Керра, если только это не диктуется дополнительными соображениями (например, если изображение должно быть передано на расстояние). Во всяком случае, как отмечают сами авторы, такой затвор уступает затвору с электронно-оптическим преобразователем.

*Л. И.*

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. Sultanoff, Rev. Sci. Inst. **21**, 653 (1950).
2. J. A. Fitzpatrick, J. C. Hubbard a. W. J. Thaler, J. App. Phys. **21**, 1269 (1950).
3. H. F. Quinn, W. B. McKay, O. J. Bourque, J. App. Phys. **21**, 995 (1950).
4. A. W. Hogan, Proc. I. R. E. **39**, 268 (1951).
5. J. S. Courtney-Pratt, Proc. Roy. Soc. **204**, 27 (1950).
6. H. A. Prime a. R. C. Turnock, Rev. Sci. Inst. **20**, 830 (1949).
7. H. A. Prime a. R. C. Turnock, Proc. Inst. Elec. Eng. **97**, Part II, 793 (1950).

### НОВОЕ В ДИФФРАКЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Сущность предложенного недавно нового принципа микроскопии — так называемой «диффракционной микроскопии» — и некоторые достигнутые с его помощью результаты уже освещались в нашем журнале<sup>1,2</sup>. Там же была отмечена весьма серьёзная трудность принципиального порядка, стоящая на пути реализации свойственных этому методу неопределимых преимуществ и препятствующая созданию полноценного диффракционного микроскопа. Однако за последнее время выяснились возможности эффективного преодоления этого, казалось, органического порока<sup>2, 3, 4, 5</sup> и, тем самым, возникла перспектива практического осуществления устройств, способных значительно расширить круг доступных микроскопическому исследованию объектов.

Напомним вкратце суть метода<sup>1, 2, 6</sup>. Как известно, процесс получения изображения с помощью оптической системы может быть условно расчленён на две стадии: 1) образование промежуточного диффракционного изображения объекта (преобразование Фурье) и 2) преобразование промежуточного диффракционного изображения в окончательное изображение объекта (обратное преобразование). Идея, положенная в основу диффракционной микроскопии, состоит в действительном расчленении этих двух стадий. Первоначально получается и фотографируется промежуточное диффракционное изображение. Затем диапозитив этого изображения («голограмма») помещается в установку, воспроизводящую условия его получения (но в отсутствие объекта), и получается окончательное изображение объекта, являющееся диффракционным изображением голограммы. (Разумеется, как получение голограммы, так и получение с её помощью изображения объекта должны вестись в монохроматическом излучении.) Ценность такого приёма состоит в том, что обе операции могут производиться с излучением различной длины волны (и различной природы). Это даёт возможность получать голограмму,

например, в рентгеновых, электронных и тому подобных лучах, а изображение — в видимом свете. При этом увеличение оказывается пропорциональным отношению длины волны излучения, применяемого для получения изображения, к длине волны излучения, применяемого для получения голограммы. (В случае рентгено-оптического микроскопа<sup>3</sup> это отношение составляет величину порядка  $10^4$ — $10^5$ .) В то же время разрешающая сила устройства зависит только от длины волны излучения, применяемого для получения голограммы. Таким образом, диффракционный микроскоп при известных условиях может сочетать необычайно высокую разрешающую способность с огромным увеличением.

Однако для получения доброкачественного изображения необходимо, чтобы голограмма воспроизводила не только амплитудные, но и фазовые соотношения на голограмме. В действительности фазовые соотношения в процессе воспроизведения изображения по голограмме нарушаются — все части промежуточного диффракционного изображения (имитируемого голограммой) оказываются синфазными. Это соответствует получению не действительного изображения объекта, а так называемого патерсоновского синтеза, со всеми присущими ему недостатками. Каков же путь для преодоления этого недостатка? Разумеется, те искусственные приёмы, которые были применены, например, в описанном ранее случае рентгено-оптического микроскопа<sup>3</sup>, являются паллиативом. Эффективное решение проблемы может быть получено только путём детального рассматривания природы изображения, получаемого с помощью голограммы<sup>3, 4, 5, 6</sup>.

Прежде всего, синфазная голограмма получается в том случае, если имеется не один, а два симметричных объекта, расположенных по разные стороны от так называемого «фокуса» голограммы. В самом деле, допустим, что на некоторую точку голограммы падает как прямое излучение  $A_0 e^{i\psi_0}$  ( $A_0$  — амплитуда,  $\psi_0$  — фаза), так и излучение, диффрактированное на объектах:  $A_1 e^{i\psi_1}$  и  $A_2 e^{i\psi_2}$ . Если положить  $A_1 = A_2$ , то для результирующей волны

$$A e^{i\psi} = e^{i\psi_0} [A_0 + A_1 (e^{i(\psi_1 - \psi_0)} + e^{i(\psi_2 - \psi_0)})]$$

и при условии  $\psi_1 + \psi_2 = 2(\psi_0 + n\pi)$

$$A = A_0 + 2A_1 \cos(\psi_1 - \psi_0) \quad \psi = \psi_0.$$

В случае  $A_1 \ll A_0$  распределение амплитуд на голограмме оказывается практически тождественным — с точностью до величин порядка  $\left(\frac{A_1}{A_0}\right)$  — с распределением амплитуд, получаемым при наличии одного объекта. Следовательно, если соблюдается условие  $A_1 \ll A_0$ , то голограмма, полученная от одного объекта, будучи использована как синфазная, даёт изображение двух объектов (ср.<sup>1</sup>) К тому же заключению легко прийти, если принять во внимание, что синфазная голограмма является аналогом зональной пластинки<sup>4</sup>. Как известно, зональная пластинка выполняет одновременно роль как собирающей, так и рассеивающей линз с одинаковым фокусным расстоянием, т. е. создаёт одновременно два изображения: действительное и мнимое, расположенные по разные стороны от пластинки.

Таким образом, неполноценность получаемого с помощью голограммы изображения (патерсоновский синтез) обусловлена тем, что на действительное изображение объекта накладывается диффракционная картина от его мнимого изображения, получающегося по другую сторону голограммы<sup>5</sup>. Если бы оказалось возможным освободиться от второго изображения или, по крайней мере, от создаваемой им диффракционной картины, то задача получения полноценного изображения с помощью синфазной голограммы была бы решена.

По существу в основе рассматриваемого способа решения задачи лежит тот общеизвестный факт, что характер дифракционной картины в какой-нибудь одной плоскости полностью определяет её характер в любых других плоскостях. Поэтому знание амплитуд двух в разных плоскостях эквивалентно знанию амплитуд и фаз в одной плоскости. Таким образом, вынужденная синфазность голограммы, при получении с её помощью изображения, может быть скомпенсирована с помощью второй голограммы. Один из возможных методов осуществления такой компенсации описывается ниже<sup>3</sup>. Допустим, что получение голограммы, так же как и её преобразование в изображение, ведётся в параллельных лучах<sup>7</sup> и что голограмма  $H_1$  получается на расстоянии  $f$  от объекта  $O$  (рис. 1, *a*). Тогда, убрав объект и поставив голограмму на прежнее место, мы получим два изображения объекта: действительное ( $I_1$ ) и мнимое ( $I_2$ ), расположенные на равных расстояниях  $f$  по разные стороны голограммы (рис. 1, *c*). При этом на действительное изображение  $I_1$

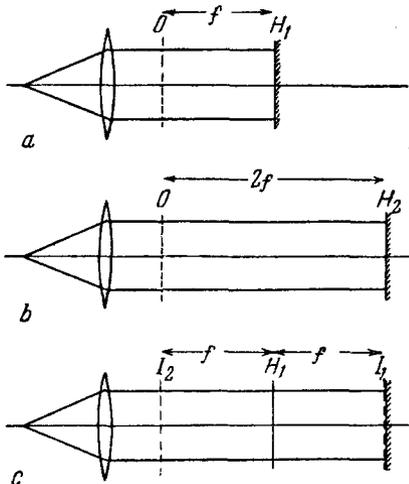


Рис. 1. Схема расположения голограмм и изображений.

будет накладываться дифракционная картина, создаваемая мнимым изображением  $I_2$ . Положим теперь, что нами независимо получено изображение этой дифракционной картины; для этого достаточно сфотографировать дифракционную картину  $H_2$ , создаваемую объектом  $O$  на расстоянии  $2f$  (рис. 1, *b*). Если теперь на месте получаемого с помощью голограммы  $H_1$  изображения  $I_1$  (рис. 1, *c*) поместить негатив («антиголограмму») дифракционной картины  $H_2$ , то тем самым дифракционная картина, создаваемая изображением  $I_2$ , будет полностью закрыта антиголограммой и фотографирование изображения  $I_1$  позади антиголограммы  $H_2$  должно дать правильное изображение объекта.

Проверка описанной методики показала справедливость положенных в её основу соображений.

В качестве источника света служило изображение (3  $\mu$  диаметром) круглого отверстия (20  $\mu$  диаметром), освещенного монохроматическим светом (ртутная линия  $\lambda = 4358 \text{ \AA}$ ). Это изображение помещалось в фокусе линзы (фокусное расстояние 175 мм), создававшей параллельный пучок лучей. Объектом служила часть прозрачной шкалы (длиной 1 дюйм), деления которой соответствовали 0,01 дюйма. Расстояние  $f$  от объекта до голограммы  $H_1$  составляло 11,0 см. Антиголограмма  $H_2$  получалась на расстоянии 22,0 см от объекта. Поскольку изображение получалось в параллельных лучах, линейное увеличение равнялось единице. Окончательное изображение получалось на той же установке, на расстоянии 11,0 см от голограммы  $H_1$ . Полученные результаты приведены на рис. 2.

Фотография *a* является обычной фотографией объекта (шкалы); *b* — репродукция основной голограммы  $H_1$ ; *c* — изображение объекта, полу-

ченное с помощью одной этой голограммы, т. е. без устранения влияния мнимого изображения; *d* — антиголограмма  $H_2$ ; *e* — изображение объекта, полученное с помощью обеих голограмм, т. е. после устранения влияния мнимого изображения  $I_2$ .

Из сопоставления рисунков нетрудно видеть, что хотя полного устранения дифракционного фона и не достигнуто, он всё же сильно ослаблен — изображение несравненно чище, чем получающееся с помощью одной голограммы, дифракционные круги вокруг цифр почти исчезли. Можно ожидать, что дальнейшее развитие техники получения и вос-

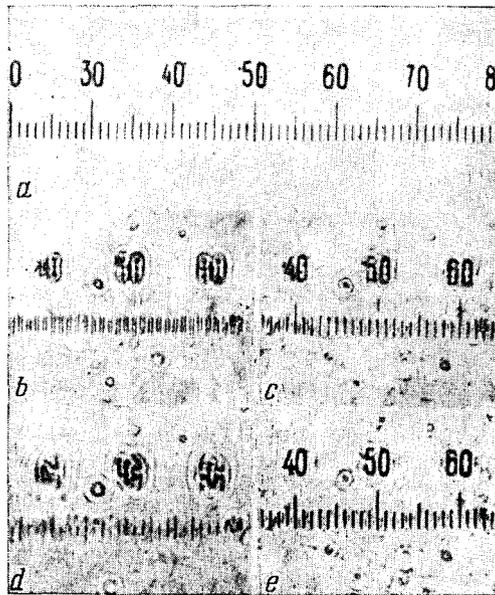


Рис. 2. Изображения, полученные методом дифракционной микроскопии по схеме рис. 1.

произведения голограмм приведёт к радикальным улучшениям. Основные трудности здесь лежат в правильном выборе условий экспозиции и проявления фотопластинок (прямолинейность и крутизна характеристической кривой), а также в возможном уменьшении фазовых искажений, вносимых голограммами в проходящий через них волновой фронт. Авторы указывают, что наиболее резко бросающиеся в глаза дефекты изображения — пятна и круги, хаотически разбросанные по полю снимка, — являются аппаратным эффектом, отнюдь не связанным с дефектами метода. Они обусловлены недостатками применённой линзы и пылинками, осевшими на её поверхности и на поверхностях голограмм. Естественно, что, как и во всяком интерференционном методе, изготовление голограмм и их воспроизведение требует высокой степени тщательности и для получения доброкачественных изображений нужна хорошо отработанная техника.

Резюмируя можно утверждать, что найден эффективный метод преодоления основного недостатка диффракционной микроскопии — синфазности голограммы — ведущего к искажению изображения. Таким образом, осуществление диффракционного микроскопа становится уже делом его технического усовершенствования, что при современном состоянии экспериментальной техники представляется сравнительно не трудным. Вряд ли представит трудности и использование его в электронной микроскопии. Значительно сложнее дело обстоит с рентгено-оптическим микроскопом, ибо не вполне пока ясно, каким путём может быть получена антиголограмма. Во всяком случае перед диффракционной микроскопией открывается широкое будущее, и можно ожидать, что в ближайшее время она займёт значительное место в микроскопических исследованиях.

*Г. Р.*

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. УФН **35**, 595 (1948).
2. УФН **43**, 144 (1951).
3. W. L. Bragg a. G. L. Rogers, *Nature* **167**, 190 (1951).
4. G. L. Rogers, *Nature* **166**, 237 (1950).
5. W. L. Bragg, *Nature* **166**, 399 (1950).
6. D. Gabor, *Proc. Roy. Soc. A* **197**, 454 (1949).
7. M. F. Haine a. J. Dyson, *Nature* **166**, 315 (1950).
8. M. J. Buerger, *J. Appl. Phys.* **21**, 909 (1950). См.<sup>2</sup>

### ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МИКРОСКОП

За последнее время в микроскопии получил широкое распространение метод фазового контраста, позволяющий получать контрастные изображения прозрачных объектов. Свообразным видоизменением этого метода является интерференционный микроскоп, предложенный автором реферруемой работы \*). Идея метода заключается в предварительном получении интерференционного изображения объекта в натуральную величину с последующим рассматриванием его в обыкновенный микроскоп.

Принцип действия устройства ясен из рисунка. Освещающий конус лучей из конденсора (не изображён на рисунке), отображающего источник света на объект, падает на плоскопараллельную пластинку, верхняя поверхность которой покрыта полупрозрачным слоем серебра. На нижней поверхности пластинки нанесено непрозрачное отражающее серебряное «пятно», размеры которого несколько больше поля зрения микроскопа.

Луч света, упавший на верхнюю полупрозрачную грань пластинки, частично проходит через неё, попадая на объект, частично же отражается на «пятно». Затем обе части луча попадают на вторую плоскопараллельную (идентичную с первой) пластинку, обе грани которой покрыты полупрозрачными слоями серебра; луч, отражённый от «пятна», частично проходит через неё, луч же, прошедший через объект, частично проходит через неё, испытав предварительно два отражения. В результате лучи воссоединяются и следуют далее по общему направлению. (Таким образом, эта часть устройства действует аналогично интерферометру Жамена). Выйдя из верхней плоскопараллельной пластинки, объединённые лучи попадают на сферическую отражающую поверхность (центр сферы совпадает с центром «пятна»; верхняя грань верхней плоскопараллельной пластинки делит радиус сферы пополам). Испытав отражение от сферической поверхности,

\*) J. Dyson, *Proc. Roy. Soc. A* **204**, 107 (1950).