

- [3] Овчинников В.В., Кузнецов В.И., Породин Б.Т., Селезнев В.Д., Ханякин А.С. Исследование вклада поверхностной диффузии при измерениях эффективного диаметра пор ядерных ультрафильтрационных мембран газодинамическим способом. Препринт ОИЯИ. № 18-85-801, Дубна, 1985. 10 с.
- [4] Борман В.Д., Крылов С.Ю., Просянов А.В. // ЖЭТФ. 1988. Т. 95. № 10. Р. 271.
- [5] Hwang S.-T., Kammermeyer K. // Separation Science. 1967. V. 2. P. 555-557.

Московский инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию
28 марта 1988 г.
В окончательной редакции
20 ноября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 3

12 февраля 1989 г.

07; 12

О РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО ФАЗОВОГО МИКРОСКОПА

В.П. Тычинский, К.Б. Самсонов,
И.Н. Мазалов

Компьютерный фазовый микроскоп по оптической схеме интерферометра Линника обеспечивает разрешение в плоскости $d \approx 0.2$ мкм и по высоте $\Delta Z \approx 1$ нм. Инвариантом является „неразрешаемый” объем $V = \Delta Z \cdot d^2 = \frac{\lambda^3}{2\pi^3} \left(\frac{\alpha}{F}\right)^{-2} \left(\frac{S}{N}\right)^{-1}$.

Экспериментально получено значение $V < 10^{-4}$ мкм³.

1. В последние годы в связи с проблемами микроэлектроники, оптической и магнитной записи информации, интегральной оптики и других областей техники ведутся интенсивные исследования новых методов измерения параметров поверхности, обеспечивающих разрешение по высоте порядка единиц ангстрем.

Для этой цели используются растровые электронные микроскопы, туннельные микроскопы, а также различные типы оптических интерферометров с модуляцией фазы опорной волны. В таких устройствах решающее значение имеет использование ЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

В дальнейшем для работ этого направления мы будем использовать термин „компьютерная оптика” (КО).

Сущность фазовых методов компьютерной оптики (ФКО) состоит в цифровом восстановлении функции высоты рельефа $Z(x, y)$ по

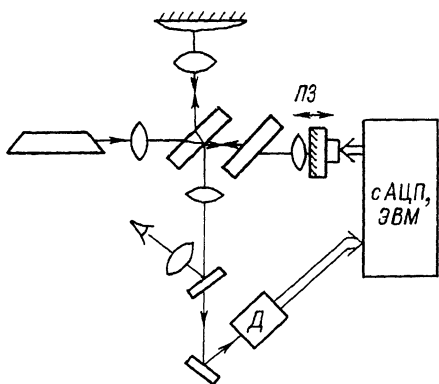


Рис. 1. Блок-схема компьютерного фазового микроскопа: Д - диссектор, ПЗ - зеркало с пьезокорректором, с АЦП - специализированный аналого-цифровой преобразователь.

измерениям фазы $\psi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} z(x, y)$, рассеянной объектом волны с помощью многоэлементного фотоприемника, расположенного в плоскости регистрации интерференционного поля [1-6]. Основные досто

инства ФКО заключаются в неконтактности измерений, возможности работы в широком спектральном диапазоне и высокой разрешающей способности по высоте профиля ($\sim \lambda / 1000$).

Однако реализованные к настоящему времени устройства ФКО не дают пространственное разрешение в плоскости объекта, равное или меньшее длины волны зондирующего света, что характерно для современных микроскопов, а использовавшиеся в работах [1, 2, 4] интерферометры Миро, Майкельсона и Тваймана-Грина не удовлетворяют указанной цели.

В этой работе сообщается о компьютерном фазовом микроскопе [5, 6] на базе микроинтерферометра Линника, обеспечивающем разрешение $\sim 0,3\lambda$, и обсуждается проблема пространственного разрешения слабоконтрастных объектов.

2. Вследствие ограниченного разрешения оптической системы измерение разности фаз $\Delta\varphi = \varphi_+ - \varphi_-$ рассеянной волны в двух близко расположенных точках объекта x_+ и x_- будет меньше истинного $\Delta\psi = \psi_+ - \psi_- = \frac{4\pi}{\lambda} [z(x_+) - z(x_-)]$. Отношение этих величин можно использовать в качестве определения функции контраста (или частотно-контрастной характеристики) $K_\varphi(d)$ оптической системы для фазовых объектов:

$$K_\varphi(d) = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi}{4\pi \Delta z(d)} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\psi}, \quad \text{где } d = x_+ - x_- \quad (1)$$

Можно показать [7], что для фазового объекта в виде двух точечных источников равной интенсивности

$$E_0(x_0) = e^{j\psi_+} \delta(x_0 - \frac{d}{2}) + e^{j\psi_-} \delta(x_0 + \frac{d}{2}) \quad (2)$$

оптическая система с импульсным откликом $h(x, -x_0)$ при φ_\pm , $\varphi_\pm \ll 1$ дает изображение $E_1(x_1) = E_0 \otimes h$ с контрастом

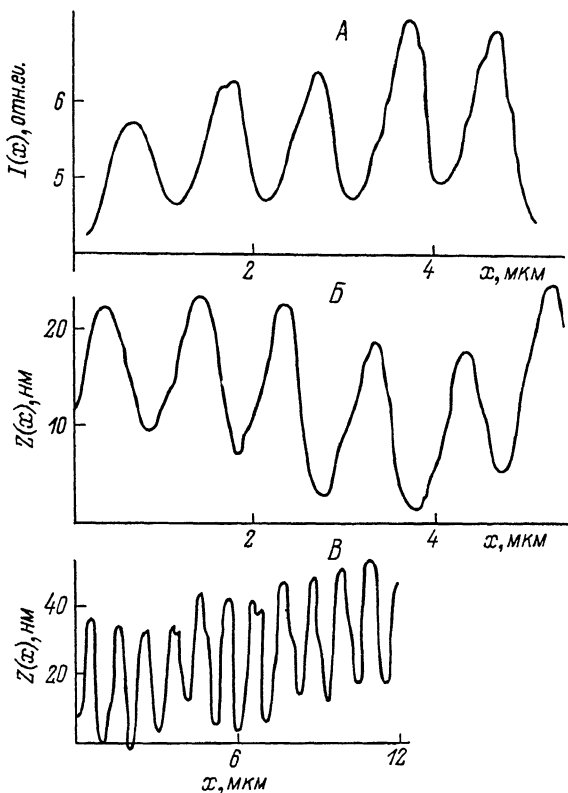


Рис. 2. Сечение профиля решетки ($L = 1$ мкм): А - распределение интенсивности по сечению изображения (отн. ед.); Б - восстановленный по измерениям фазы профиль (нанометры); В - профиль нанометры, измеренный щуповым прибором (*Talystep*, радиус иглы 0,1 мкм).

$$K_{\varphi}(d) = \frac{1 - h(d)}{1 + h(d)}. \quad (3)$$

Для объектива с числовой апертурой a/F

$$h(d) = \frac{2J_1\left(\frac{kad}{F}\right)}{\frac{kad}{F}} \quad \text{и} \quad K_{\varphi}(d) = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\psi} \approx \left(\frac{kad}{4F}\right)^2. \quad (4)$$

Из (4) следует, что разрешение d фазового объекта ограничивается минимальным значением достоверно измеряемой разности фаз $\Delta\varphi$. Естественное ограничение в точности измерения $\Delta\varphi$ связано с присутствием фазовых шумов

$$\Delta\varphi_{ш} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{S}{N}\right)^{-1}. \quad (5)$$

В общем случае S/N - отношение сигнал/шум, обусловленное техническими и квантовыми флуктуациями, которое определяет число различных состояний фазы.

Полагая $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{ш}}$, из (4) и (5) можно получить оценку величины „неразрешаемого“ объема:

$$V = \Delta Z d^2 \approx \frac{\lambda^3}{2\pi^3} \left(\frac{\alpha}{F}\right)^{-2} \left(\frac{S}{N}\right)^{-1} \quad (6)$$

Соотношение (6) подобно так называемому критерию Ингельстама [8] $(\Delta x)^2 \Delta Z \gg m \lambda^3/4$, полученному из других исходных соображений, где m - порядок интерференции, δ - наименьшее разрешаемое смещение, отнесенное к ширине аппаратной функции.

В описываемом ниже эксперименте значение $V \approx 4 \cdot 10^{-5}$ мкм³ оказалось в несколько раз ниже расчетного по формуле (6) $V = 10^{-4}$ мкм³ для $\alpha/F = 1$, $S/N \approx 50$.

В заключение отметим, что в отличие от монотонной зависимости $K_{\varphi}(d)$ (4) функция амплитудного контраста $K_A(d)$ для двух точечных источников при некогерентном освещении

$$K_A(d) = \frac{1 + [h(d)]^2 - 2[h(\frac{d}{2})]^2}{1 + [h(d)]^2 + 2[h(\frac{d}{2})]^2}$$

дает $K_A = 0.15$ для $kad/F = 3.83$ (критерий Рэлея) и отрицательный контраст при $kad/F < 3.25$.

3. Экспериментальные исследования [5] проводились на компьютерном фазовом микроскопе [6] (рис. 1), состоящем из микроинтерферометра Линника ($\alpha/F = 0.65$), диссектора Д, зеркала с пьезокорректором ПЗ, специализированного аналого-цифрового преобразователя - с АЦП [9] и ЭВМ „Электроника-60“. В качестве фазовых тест-объектов использовались отражательные дифракционные решетки. Уровень фазовых шумов аппаратуры составлял $\sim 10^{-2}$ рад при $\lambda = 0.63$ мкм.

На рис. 2 приведены результаты измерений микрорельефа решетки с шагом $L = 1$ мкм: А - распределения интенсивности по сечению изображения решетки ($L = 1$ мкм); Б - восстановленного по измерениям фазы сечения $Z(x)$ микрорельефа (в нанометрах); В - сечения микропрофиля той же решетки, измеренного шуповым прибором *Talystep*.

Из сравнения рис. 2, Б и 2, В можно получить оценку величины фазового контраста $K_{\varphi} = 0.5$ на базе, равной половине шага $d = \frac{L}{2} = 0.5$ мкм, что согласуется с расчетным значением $K_{\varphi} = 0.7$ для $\frac{K\alpha L}{2F} = 3.24$.

Наибольшее разрешение, полученное на решетке с $L = 0.55$ мкм и объективом 60 \times ($\frac{\alpha}{F} = 1$), составляло $d = 0.15-0.2$ мкм при контрасте $K_{\varphi} \approx 0.5$.

Можно ожидать, что усовершенствование компьютерного фазового микроскопа и укорочение длины волны позволят получить $d < 0,1$ мкм, $\Delta z \approx 0,1-0,5$ нм, что соизмеримо с разрешением растровых электронных микроскопов.

Л и т е р а т у р а

- [1] W u a n t J.C., C r e a t h K. // Laser focus / electro-optics. 1985. N 11. P. 113-132.
- [2] B h u s h a n B., W u a n t J.C., K o l i o p o u l o s C.L. // Ap. Opt. 1985. T. 24. N 10. P. 1489-1497.
- [3] Евдокимов М.В., Козлов С.Н., Мазалов И.Н., Тычинский В.П. Тезисы XII конференции „Когерентная и нелинейная оптика“, М., 1985 с. 147.
- [4] S a s a k i O., O k a z a k i H. // Ap. Opt. 1986. T. 25. N 18. P. 3137-3140.
- [5] Тычинский В.П., Мазалов И.Н., Евдокимов М.В. Ernst-Abbe Conferenz. Тезисы докладов, Иена, 1987, с. 44.
- [6] Мазалов И.Н., Тычинский В.П., Самсонов К.Б. // Электронная промышленность. 1987. № 5. с. 54.
- [7] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
- [8] Каргашов А.И., Эцин И.Ш. // УФН, 1972. Т. 106. В. 4. С. 687.
- [9] Тычинский Е.П., Евтихийев Н.Н., Захаров В.П., Снежко Ю.А. // Измерительная техника. 1987. № 12. С. 39-42.

Московский институт
радиотехники, электроники
и автоматики

Поступило в Редакцию
6 мая 1988 г.
В окончательной редакции
10 декабря 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 3

12 февраля 1989 г.

05; 08

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ АКУСТОЭЛЕКТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ТОНКОМ АКТИВНОМ КАНАЛЕ ОБЪЕМНОГО ПЬЕЗОПОЛУПРОВОДНИКА

Ю.В. А р и с т о в, В.М. Р ы с а к о в

Аналізу процесса развития акустической неустойчивости (АН) в пьезополупроводниках, возникающей при движении электронов со сверхзвуковой скоростью, посвящено много работ (см., например, библиографию в [1]), однако ряд его особенностей не получил удовлетворительного объяснения. Одна из возможных причин этого -