

07; 12

© 1991

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ  
СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ФАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВВ.П. Т ы ч и н с к и й, А.В. Т а в р о в,  
Д.О. Ш е п е л ь с к и й, А.Г. Ш у ч к и н

Использование компьютерных методов обработки и необычных свойств фазовых изображений [1, 2] создало предпосылки для технической реализации компьютерного фазового микроскопа [3], обладающего сверхрелеевским разрешением. Наиболее существенная особенность фазовых изображений состоит в том, что на них не распространяется критерий Рэлея, и число разрешаемых элементов внутри диска Эйри может приближаться к отношению сигнал/шум измерительной системы [2].

Необычные свойства изображений фазовых объектов видны из следующих соображений.

Согласно классической теории оптических систем [4], комплексный сигнал  $\bar{E}_0(\rho)$  в плоскости изображения может быть представлен сверткой входного сигнала  $\bar{E}_i(r)$  и аппаратной функции системы  $h(r)$

$$\bar{E}_0(\rho) = \int \bar{E}_i(r) h(\rho-r) dr. \quad (1)$$

Из (1) следует, что модуль  $|\bar{E}_0(\rho)|$  может заметно изменяться только на расстояниях  $\Delta\rho$ , больших или порядка ширины  $d_R$  аппаратной функции  $h(r)$ , где для линзы  $d_R = 0.61 \lambda F / \alpha$  (2) – радиус диска Эйри,  $F$  – фокальное расстояние,  $2\alpha$  – диаметр. Для скорости  $\partial\psi / \partial\rho$  изменения фазы  $\psi(\rho) = \arg[\bar{E}_0(\rho)]$  нет фундаментальных ограничений и, в частности, для знакопеременной функции  $\bar{E}_0(\rho)$   $\psi(\rho)$  испытывает  $\pi$ -скачок в окрестности  $\bar{E}_0(\rho) = 0$ . Это является достаточным условием возникновения дислокации волнового фронта [5]. Координаты точек, где  $\bar{E}_0(\rho) = 0$  могут быть определены с помощью некоторого устройства (фазометра) с высокой точностью  $d \ll d_R$ . Соответственно, расстояние  $d$  между смежными дислокациями не ограничено классическим критерием (2), это является предпосылкой для обоснования сверхразрешения в изображении фазовых объектов.

Возникает естественный вопрос – в какой степени распределение фазы  $\psi(\rho)$  адекватно объекту  $\varphi(r) = \arg[\bar{E}_i(r)]$  и можно ли его рассматривать в качестве характеристики профиля объекта  $Z(r)$ ? Из (1) следует, что для медленно меняющихся функций  $\bar{E}_i(r)$  справедливо используемое в профилометрии [6] геомет-

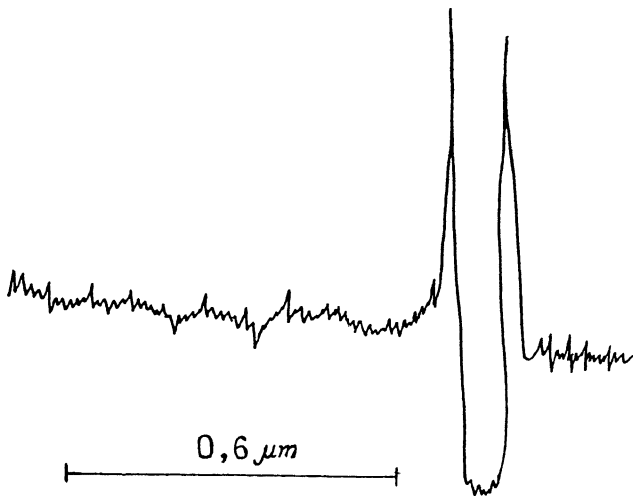


Рис. 1. Сечение полупроводниковой структуры с шириной щели 0,1 мкм в слое  $SiO_2$ , полученное на РЭМе „Hitachi S-800“ в режиме видеосигнала.

рооптическое приближение  $\psi(\rho/M) \approx \varphi(r) = \frac{4\tilde{\pi}z(r)}{\lambda}$ , (3).

где в данном случае  $M$  – линейное увеличение. Однако при соизмеримых с  $d_R \sim \lambda$  размерах структурных элементов, как показывают модельные расчеты с использованием методов строгой теории дифракции [4], соотношение (3) оказывается некорректным. Не останавливаясь более обстоятельно на результатах численного моделирования различных объектов и обсуждении ряда методических вопросов, приведем результаты экспериментов, подтверждающих реальность сверхразрешения [1, 2] в изображениях фазовых объектов.

Измерения были осуществлены на компьютерном фазовом микроскопе „Эйрискан“ [3], созданном на основе микроинтерферометра Линника. В качестве осветителя был использован гелий-неоновый лазер ( $\lambda = 0.63$  мкм). Для регистрации интерференционного сигнала применялся диссектор. Отображение распределения фазы в виде топограмм и стереопроекций на дисплее IBM PC/AT осуществлялось с помощью электронного блока и соответствующего матобеспечения.

Результаты измерений фазы представлялись в эквивалентных единицах высоты профиля по формуле (3). Для объектива  $100\times/0.95$  номинальное разрешение было равно  $d_R = 0.43$  мкм.

Образцы субмикронных структур, используемые для аттестации РЭМ, были разработаны и исследованы в ИОФАН СССР [7].

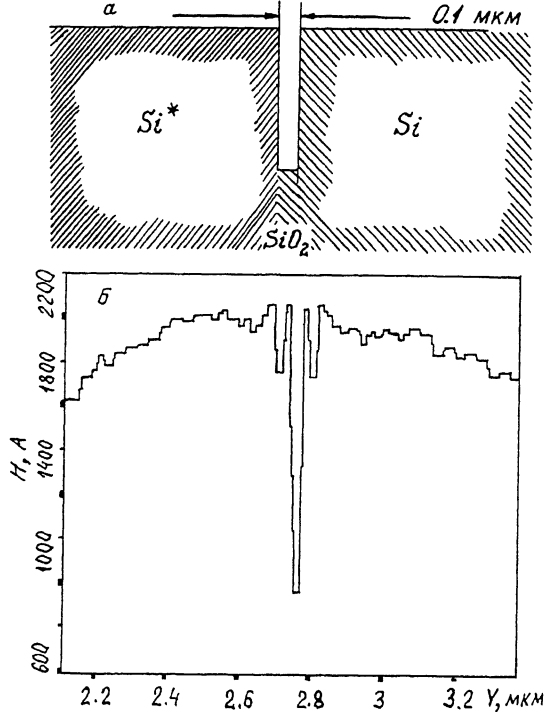


Рис. 2. Атгестованная полупроводниковая структура с шириной щели 0.1 мкм в слое  $SiO_2$ : а - схема, б - профиль сечения, измеренного на КФМ „Эйрискан“.

Они представляли собой сэндвич  $Si - SiO_2 - Si^*$  со строго определенной толщиной  $d$  слоя  $SiO_2$  и двухмикронным слоем поликремния  $Si^*$ .

На сколе сэндвича после травления  $SiO_2$  появлялась щель шириной  $d$ , которая измерялась на РЭМ Hitachi-S-806. Методика изготовления и атгестации изложена в препринте [7]. На рис. 1 приведен видеосигнал с резкими максимумами, соответствующими границами щели. На рис. 2, а показана структура эталона, на рис. 2, б профиль сечения, полученный на КФМ „Эйрискан“ для образца с  $d=100$  нм. Ширина щели  $d$  с точностью до погрешности калибровки рабочего поля ( $\sim 10\%$ ) совпадает с измеренной на РЭМ. Осцилляции фазы у краев щели не подтвердились стереоизображением на РЭМ и связаны, по-видимому, с артефактами, природа которых пока не вполне ясна. Критичность фокусировки, по нашим оценкам, была около 0.1 мкм.

Аналогичные результаты были получены для щелей с шириной  $d=0.05-0.5$  мкм. Следовательно, несмотря на отсутствие строгого теоретического обоснования, для фазовых объектов в виде щели с  $d \ll d_R$  результаты измерений на КФМ „Эйрискан“ дали вполне правоподобные изображения профиля.

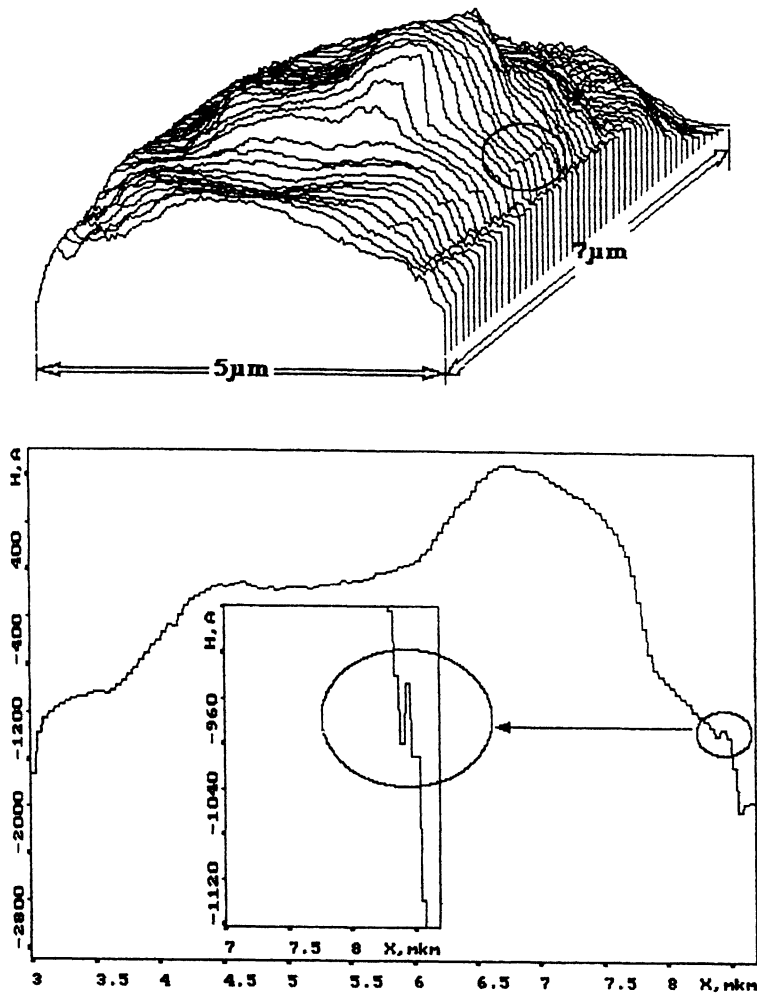


Рис. 3. Изображение водоросли „*Cyclotella*“. Стереοизображение (в верхней части рисунка). Фрагмент сечения со следом клеточной мембраны (внизу).

Насколько нам известно, эти результаты оптических измерений независимо аттестованных субмикронных структур получены впервые. Проблема строгой метрологической аттестации субмикронных структур достаточно сложна [8], мы оцениваем погрешность наших измерений величиной порядка 10 %. Это обстоятельство не препятствует, однако, качественному анализу объектов различной физической природы. Нами были получены изображения сфер латекса диаметром 0.2 мкм, топологических элементов СВИС, лазерных видео-

дисков, отражательных дифракционных решеток 1800 л/мм, цилиндрических магнитных доменов, эритроцита и других биообъектов. В рамках этой короткой заметки не представляется возможным описание этих результатов, однако следует отметить, что во многих случаях получались вполне правоподобные изображения и удавалось регистрировать структурные элементы с линейными размерами до 10 нм [9]. В качестве одного из примеров на рис. 3 приведено стереоизображение ядра одноклеточной водоросли *Cyclotella* и фрагмент сечения со следом предполагаемой клеточной мембраны (ширина  $\sim 35$  нм). Эти результаты указывают на реалистичность использования КФМ „эйрискан“ для прижизненной микроскопии.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Т у с х и н с к у V.P. // Opt. Comm. 1990. V.74. N 12. P. 41-45.
- [2] Т у с х и н с к у V.P. // Opt. Comm. 1991. V.80. N 4.
- [3] Т у с х и н с к у V.P., М а с а л о в I.N., Р а н к о в V.L., У б л и н с к у D.V. // Opt. Comm. 1990. V. 74. N 1-2.
- [4] Б о р н М., В о л ь ф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 388 с.
- [5] N u e J.F. Proc. Roy. Soc. London., A-378, 1981, 219 p.
- [6] С r e a t h К. // SPIE. Proc. 1991. V. 1164.
- [7] М а р т ы н о в В.В., Н е м ц е в Г.З., Н о в и - к о в Ю.А., П е ш е х о н о в С.В., П р о х о р о в А.М., Р а к о в А.В., С т р и ж к о в И.Б., Щ у ч к и н А.Г. Проблемы измерения линейных размеров рельефных структур субмикронных на растровом электронном микроскопе. ИОФАН СССР. 1990. Препринт № 51. 33 с.
- [8] А м м о с о в Р.С., К у з н е ц о в В.В., Н и к и - т и н А.В. // Электронная техника. 1985. Сер. 3. № 3. С. 16.
- [9] Т ы ч и н с к и й В.П., Т а в р о в А.В. // Квантовая электроника. 1990. № 3. С. 264.

Поступило в Редакцию  
19 мая 1991 г.