

07; 12

© 1991

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЙ
ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОПС.И. Б о ж е в о п ь н ы й, А.В. П о с т н и к о в,
П.С. Р а д ь к о

В последнее время для исследования поверхности предложены различные варианты дифференциальных фазовых оптических микроскопов (ДФОМ), позволяющих измерять неоднородности оптического рельефа с высокой точностью ($\lesssim 10^{-2}$ А по теоретическим оценкам) [1-3], и дифференциальный амплитудный оптический микроскоп (ДАОМ), с помощью которого можно регистрировать изменения коэффициента отражения теоретически вплоть до 10^{-6} [4, 5]. Представляет несомненный интерес одновременное измерение фазовых и амплитудных неоднородностей исследуемой поверхности. ДФОМ с регистрацией амплитуды [6, 7] имеют ограниченную точность измерения коэффициента отражения ($\sim 3\%$) вследствие флуктуаций интенсивности лазерного излучения. Дифференциальный оптический профилометр [8], недавно предложенный для одновременного измерения амплитудных и фазовых изменений сканирующей поверхность лазерного пучка, обладает низким разрешением в плоскости объекта (~ 400 мкм), что обусловлено конструктивными особенностями устройства.

В настоящей работе сообщается о создании дифференциального амплитудно-фазового оптического микроскопа (ДАФОМ), который при высоком разрешении в плоскости объекта позволяет одновременно измерять с высокой точностью неоднородности оптического рельефа и изменения отражающей способности исследуемой поверхности.

Принцип работы предлагаемого нами ДАФОМ заключается в измерении разности фаз и интенсивностей двух пучков лазерного излучения, отраженных от близких участков исследуемой поверхности (рис. 1). Эти пучки формируются вследствие брэгговской дифракции излучения лазера мощностью ~ 20 мВт на длине волны $\lambda = 0,633$ мкм в акустооптической ячейке, где возбуждаются две бегущие акустические волны на частотах $f_1 = 78$ МГц и $f_2 = 80$ МГц, что приводит к соответствующим смещениям частот дифрагированных пучков излучения. Проходящие через делитель пучки излучения фокусируются объективом на поверхность исследуемого образца и после отражения от нее разделяются на направляемые непосредственно на фотодиод и проходящие через акустооптический дефлектор на стоячей волне ($f_3 = 1,104$ МГц), ко-

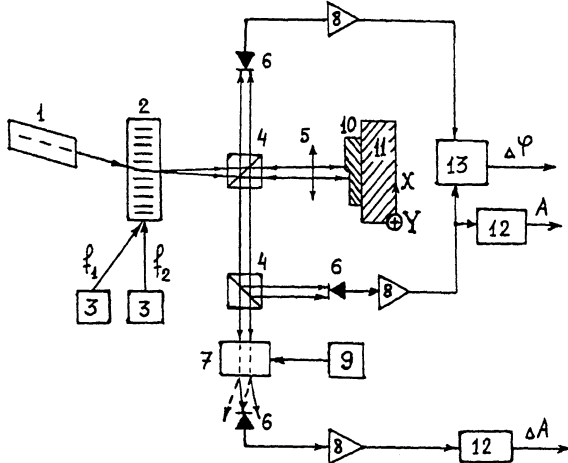


Рис. 1. Схема ДАФОМ: 1 - лазер; 2 - акустооптическая ячейка; 3 - генераторы сигналов, возбуждающих акустические волны в ячейке 2; 4 - делитель мощности оптического излучения; 5 - объектив; 6 - фотодиоды; 7 - акустооптический дефлектор на стоячей волне; 8 - резонансные усилители; 9 - генератор сигнала для возбуждения стоячей акустической волны в дефлекторе 7; 10 - исследуемый объект; 11 - двухкоординатный столик; 12 - высокочастотные вольтметры; 13 - фазометр.

торый попеременно направляет их на второй фотодиод. Переменная составляющая сигнала первого фотодиода на разностной частоте $f_2 - f_1 = 2$ МГц выделяется резонансным усилителем (коэффициент усиления $K \sim 30$ дБ, ширина полосы $\Delta f \sim 20$ кГц) и фаза этого сигнала $\Delta\varphi$ измеряется фазометром путем сравнения с фазой опорного сигнала [2, 7]. Амплитуда сигнала A пропорциональна произведению амплитуд отраженных от поверхности пучков, и позволяет определять коэффициент отражения исследуемого образца [6, 7]. Сигнал второго фотодиода на частоте f_3 выделяется резонансным усилителем ($K \sim 60$ дБ, $\Delta f \sim 100$ кГц) и измеряется высокочастотным вольтметром. Измеряемая величина ΔA пропорциональна разности интенсивностей пучков излучения, отраженных от близких участков исследуемой поверхности. Таким образом, минимальная детектируемая величина относительного изменения коэффициента отражения, как и в случае ДАОМ [5], не зависит от флуктуаций интенсивности лазерного излучения и может достигать (в пределе дробовых шумов) для параметров рассматриваемой схемы значения $\delta r / r \sim 10^{-5}$.

Для экспериментального исследования характеристик ДАФОМ в качестве тестовых образцов использовались пластинки кремния, на которые напылялись слои различных металлов методом высокочастотного ионно-плазменного распыления. Толщины слоев предвари-

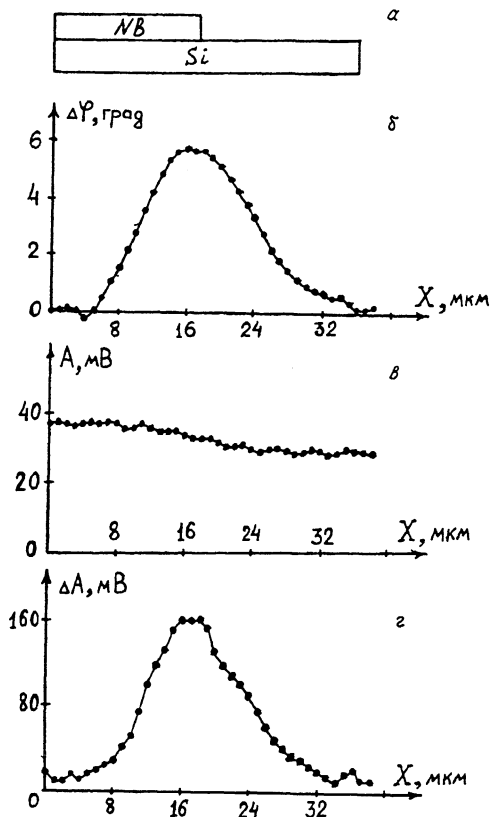


Рис. 2. Зависимости разности фаз $\Delta\varphi$ (б) и амплитуды A (в) сигнала „объектного“ фотодиода, а также ΔA (г) фотодиода, расположенного после дефлектора, от положения исследуемого образца по координате X , измеренные для слоя Nb толщиной $\sim 50 \text{ \AA}$ на поверхности подложки из кремния (а) с помощью 3-кратного объектива.

тельно определялись по измеренной скорости ($\sim 0.5 \text{ \AA}/\text{с}$) и времени напыления [9]. Исследование поверхности проводилось путем сканирования микроскопом образца в направлении X перпендикулярно границе напыленного слоя с точностью 0.5 мкм при различных положениях его по координате Y (рис. 1). Использование различных (3-, 8- и 20-кратного) объективов для фокусировки излучения на исследуемую поверхность приводило к одинаковому значению максимального изменения разности фаз, что свидетельствует о достаточно резкой границе слоя. При этом полуширина зависимостей $\Delta\varphi(x)$ и $\Delta A(x)$ (рис. 2) определяется шириной пучков излучения и расстоянием между ними на поверхности объекта (11 мкм и 14 мкм для 3-кратного объектива).

Толщина слоя h находилась по максимальному изменению разности фаз $\Delta\varphi$ сигналов фотодиодов (рис. 2, б) согласно соотношению $h = \lambda\Delta\varphi/4\pi$ и совпадала с предварительной оценкой в пределах 20%. Точность измерения разности фаз, которая определялась по разбросу показаний фазометра при фиксированных положениях объекта и многократном сканировании ступеньки рельефа, составляла 0.25° , что связано с нестабильностью разностной частоты 2 МГц [7] и приводит к погрешности в определении толщины слоя $\delta h \approx 2 \text{ \AA}$. Регистрация амплитуды A сигнала на частоте 2 МГц (рис. 2, в) позволяла измерять относительное изменение коэффициента отражения с точностью $\approx 3\%$, тогда как такая же погрешность в измерении величины ΔA (рис. 2, г) приводит к минимальной детектируемой величине $\delta r / r \approx 0.6\%$. Таким образом, переход к дифференциальной схеме измерения отражательной способности поверхности позволил увеличить амплитудную чувствительность микроскопа в пять раз. Дальнейшее увеличение точности регистрации изменений коэффициента отражения (вплоть до предельного значения 10^{-5}) требует, по нашему мнению, улучшения экранирования приемного фотодиода и усилителя, а также механической стабильности компонент оптической схемы. Кроме того, на величину сигнала и точность его измерения может оказать существенное влияние выбор параметров пучков излучения, угла сканирования их дефлектором и размер чувствительной области фотодиода. Следует заметить, что, несмотря на значительное увеличение точности измерений $\delta r / r$ в дифференциальной схеме, параллельное измерение величины A повышает надежность интерпретации экспериментальных результатов. Что касается пространственного разрешения ДАФОМ в плоскости объекта, которое в основном определяется расстоянием между двумя сфокусированными пучками в этой плоскости [2, 6-8], то оно зависит от объектива, используемого для фокусировки излучения на исследуемую поверхность, и для 20-кратного объектива составляет $d \approx 2.5 \text{ мкм}$.

Таким образом, в настоящей работе предложен и реализован макет микроскопа (ДАФОМ), с помощью которого можно производить при высоком разрешении в плоскости объекта одновременное измерение амплитудных и фазовых характеристик исследуемой поверхности по дифференциальной схеме, что позволяет существенно увеличить чувствительность микроскопа. При этом достигнуты разрешение по глубине фазового рельефа поверхности $\delta h \approx 2 \text{ \AA}$, минимальная детектируемая величина относительного изменения коэффициента отражения $\delta r / r \approx 6 \cdot 10^{-3}$ и разрешение в плоскости объекта $d \approx 2.5 \text{ мкм}$.

В заключение авторы выражают благодарность Ф.А. Пудонину за изготовление тестовых образцов, а также И.М. Ахмеджанову и Е.А. Божевольной за помощь и полезные обсуждения в ходе работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] See C.W., Vaez Iravani M., Wickramansinghe H.K. // Appl. Optics. 1985. V. 24. N 15. P. 2373-2379.
- [2] Chung H., Walpita L.M., Chang W.S.C. // Appl. Optics. 1986. V. 25. N 18. P. 3014-3017.
- [3] Vaez Iravani M. // Electron. Lett. 1986. V 22. N 2. P. 103-105.
- [4] See C.W., Vaez Iravani M. // Electron. Lett. 1986. V. 22. N 18. P. 961-962.
- [5] See C.W., Vaez Iravani M. // Appl. Optics. 1988. V. 27. N 13. P. 2786-2792.
- [6] Laeri F., Strand T.C. // Appl. Optics. 1987. V. 26. N 11. P. 2245-2249.
- [7] Божевольный С.И., Золотов Е.М., Постников А.В., Радько П.С. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 12. С. 1-5.
- [8] See C.W., Appel R.K., Somekh M.G. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 1. P. 10-12.
- [9] Виткалов С.А., Пудонин Ф.А., Сокол Е.Г., Суслов И.М. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. № 3. С. 160-162.

Поступило в Редакцию

17 апреля 1990 г.

В окончательной редакции

3 декабря 1990 г.