

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ФАЗОВЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП С РЕГИСТРАЦИЕЙ АМПЛИТУДЫ

С.И. Б о ж е в о л ь н ы й, Е.М. З о л о т о в,  
А.В. П о с т н и к о в, П.С. Р а д ь к о

В последнее время для исследования рельефа поверхности или неоднородностей показателя преломления прозрачных материалов предложены различные варианты дифференциальных фазовых оптических микроскопов (ДФОМ), с помощью которых можно измерять изменения в оптической длине пути с высокой точностью ( $\lesssim 10^{-2} \text{ \AA}$  по теоретическим оценкам) [1, 2]. ДФОМ, работающий по двухчастотной схеме [2], представляется наиболее простым и надежным в реализации, поскольку позволяет непосредственно измерять разность фаз пучков излучения, отраженных от различных участков исследуемой поверхности, при этом используется только один активный элемент — акустооптическая ячейка. Характеристики экспериментально реализованного ДФОМ этого типа составляли  $\delta \approx 10 \text{ \AA}$  ( $\delta$  — разрешение по глубине рельефа поверхности) и  $d \approx 10 \text{ мкм}$  ( $d$  — разрешение в плоскости объекта) [2].

В настоящей работе предпринята попытка улучшить характеристики двухчастотного ДФОМ, а также предложено производить одновременную регистрацию не только фазы, но и амплитуды сигнала для расширения возможностей микроскопа.

Устройство и принцип работы ДФОМ рассматриваемого типа подробно изложены в работе [2]. Реализованный нами вариант ДФОМ отличается значительным упрощением оптической части схемы (подавление вредного влияния многократных отражений достигается небольшим поворотом оптических элементов относительно оптической оси), а также измерением амплитуды сигнала „объектного“ фотодиода,

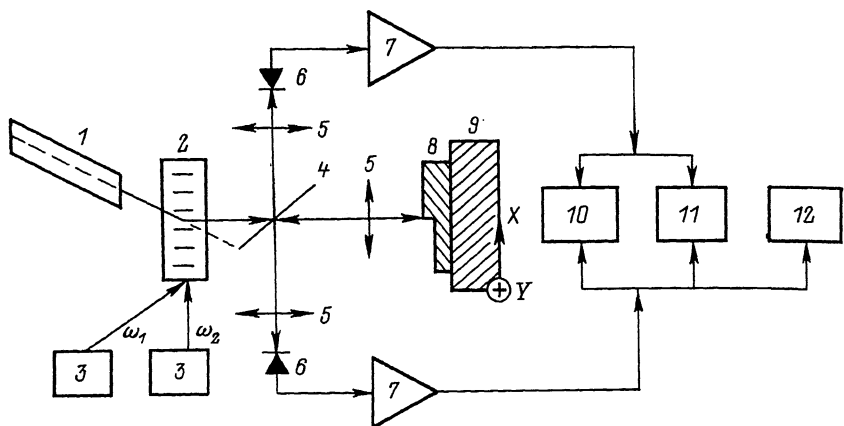


Рис. 1. Схема ДФОМ: 1 - лазер, 2 - акустооптическая ячейка, 3 - генераторы сигналов, возбуждающих акустические волны в ячейке 2, 4 - делитель мощности оптического излучения, 5 - фокусирующие линзы, 6 - фотодиоды, 7 - резонансные усилители, 8 - исследуемый объект, 9 - двухкоординатный столик, 10 - фазометр, 11 - двухлучевой осциллограф, 12 - высокочастотный вольтметр.

освещаемого пучками отраженного от объекта излучения (рис. 1). Излучение  $He - Ne$  лазера ЛГ-38 мощностью  $\sim 20$  мВт на длине волны  $\lambda = 0.633$  мкм направляется под углом Брэгга на акустооптическую ячейку МЛ-201, которая отклоняет около 20 % падающего излучения при мощности управляющего сигнала  $\sim 1$  Вт в области частоты 80 МГц. При подаче на акустооптическую ячейку сигналов от двух генераторов на частотах 78 и 80 МГц дифрагированное излучение представляет собой два пучка, разрешимых по углу в дальней зоне, с частотами, смещенными на частоты бегущих акустических волн. Проходящие через делитель пучки излучения фокусировались на поверхность исследуемого образца  $3\times$ ,  $8\times$  и  $20\times$  кратными объективами в два пятна размерами 6.4, 2.8 и 1.1 мкм на расстоянии 6, 2.5 и 1 мкм соответственно. Измерения указанных величин проводились путем отображения фокальной плоскости объектива на видикон телекамеры с выводом строки на осциллограф, при этом полученные результаты также сопоставлялись с расходимостью фокусируемого излучения так, что точность измерений оценивается на уровне 15 %. Пучки излучения, отраженные делителем и поверхностью образца, фокусируются на фотодиоды, фазы сигналов которых на разностной частоте 2 МГц сравниваются после усиления резонансными усилителями на фазометре. Коэффициент усиления и ширина полосы используемых усилителей составляли  $\sim 30$  дБ и  $\sim 20$  кГц соответственно. При этом также проводился визуальный контроль сигналов с помощью двухлучевого осциллографа и измерение амплитуды сигнала „объектного“ фотодиода. Изменение амплитуды

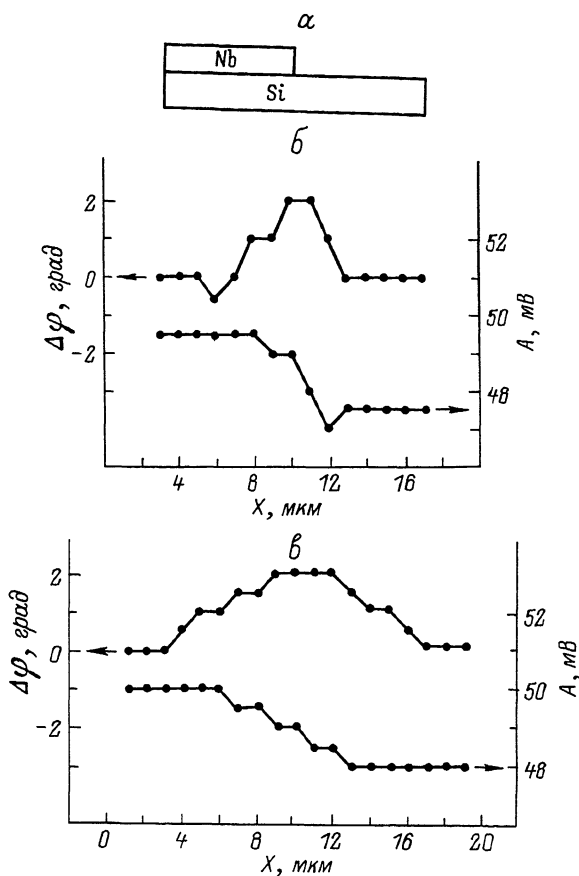


Рис. 2. Зависимости разности фаз  $\Delta\varphi$  и амплитуды  $A$  сигнала „объектного“ фотодиода от положения исследуемого образца по координате  $X$ , измеренные для слоя  $Nb$  толщиной  $\sim 20 \text{ \AA}$  на поверхности подложки из кремния (а) с помощью  $8^{\times}$ -кратного (б) и  $3^{\times}$ -кратного (в) объективов.

сигнала свидетельствует об изменении коэффициента отражения, что для плоской поверхности эквивалентно изменению химического состава поверхности. Исследование фазового рельефа поверхности осуществляется путем сканирования образца вдоль оси  $X$  при различных положениях его по координате  $Y$  (рис. 1).

Для экспериментального исследования характеристик ДФОМ в качестве тестовых образцов были взяты пластинки кремния, на которые напылялись слои различных металлов ( $Nb$ ,  $V$ ,  $Ni$ ) толщинами от 20 до 100  $\text{\AA}$  методом высокочастотного ионно-плазменного распыления. Толщины слоев предварительно оценивались по времени напыления согласно линейной зависимости толщины слоя от времени ( $\sim 50 \text{ \AA}/\text{мин}$ ), измеренной для каждого металла. Образцы помещались в направлении, перпендикулярном границе напыленного слоя,

с точностью 1 мкм, при этом толщина слоя  $h$  определялась по максимальному изменению разности фаз  $\Delta\varphi$  сигналов двух фотодиодов (рис. 2) согласно соотношению  $h = \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi}$  ( $\lambda$  - длина волны излучения в воздухе). Для каждого образца проводилось несколько измерений при различных значениях координаты  $Y$ , при этом разброс полученных значений  $h$  составлял  $\sim 30\%$ . Среднее значение измеренных результатов расходилось с предварительной оценкой толщины слоя в пределах 20%.

Точность измерения разности фаз  $\Delta\varphi$  определялась по разбросу показаний фазометра при фиксируемом положении исследуемой поверхности и составляла  $0.5^\circ$  (собственная погрешность прибора в этом диапазоне частот  $\sim 0.05^\circ$ ). Флуктуации значений разности фаз  $\Delta\varphi$  обуславливались, по нашему мнению, нестабильностью разностной частоты 2 МГц вследствие дрейфа частот задающих генераторов, что приводило к нестабильности фазы сигналов на выходе усилителей. Погрешность в измерении разности фаз  $\Delta\varphi$  приводит к погрешности в определении толщины слоя, составляющей в нашем случае  $\delta \simeq 4 \text{ \AA}$ . Разрешение в плоскости объекта определяется расстоянием между двумя сфокусированными пучками в этой плоскости и их шириной, что для используемых объективов составляло  $d \simeq 12, 5$  и  $2$  мкм соответственно. Однако при использовании  $20\times$ -кратного объектива значительно уменьшалась надежность измерения толщины слоя вследствие небольшой точности ( $\sim 1$  мкм) механического перемещения исследуемой поверхности вдоль оси  $X$  (необходимо подстраивать перемещение на максимальное изменение разности фаз  $\Delta\varphi$ ). Кроме того, возможным источником погрешности в измерении толщины слоя может являться в данном случае размытость границы слоя, которая наблюдалась в ряде образцов на уровне 2–5 мкм. Таким образом, для измерения толщины слоя наиболее целесообразно было использовать  $3\times$ -кратный объектив, позволяющий уверенно регистрировать положение и величину максимального приращения  $\Delta\varphi$  (рис. 2).

Регистрация амплитуды сигнала „объектного“ фотодиода, освещаемого отраженными от исследуемой поверхности пучками излучения, является особенно важной при измерении толщины тонких слоев ( $\sim 20 \text{ \AA}$ ), где неоднородности толщины слоя, загрязненность или окисление поверхности могут вносить свои изменения в фазу сигнала, по величине близкие к максимальному приращению  $\Delta\varphi$  на границе слоя. В этом случае изменение коэффициента отражения, приводящее к изменению амплитуды сигнала „объектного“ фотодиода, позволяет однозначно судить о переходе границы исследуемого слоя и измерять по соответствующей разности фаз именно толщину данного слоя (рис. 2).

Таким образом, в настоящей работе проведено экспериментальное исследование ДФОМ, работающего по двухчастотной схеме, при этом достигнуто разрешение по глубине рельефа поверхности  $\delta \simeq 4 \text{ \AA}$  и разрешение в плоскости объекта  $d \simeq 5$  мкм. Предложено и показана целесообразность использования одновременной

регистрации не только фазы, но и амплитуды сигнала „объектного“ фотодиода для идентификации перехода границы и измерения толщины тонкого слоя.

В заключение авторы выражают благодарность Ф.А. Пудонину за изготовление образцов для исследования, а также И.М. Ахмеджанову за помощь в работе.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] S e e C.W., V a e z I r a v a n i M. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 15. P. 2373-2379.  
[2] C h u n g H., W a l p i t a L.M., C h a n g W.S.G.// Appl. Opt. 1986. V. 25. N 18. P. 3014-3017.

Ярославский  
политехнический институт

Поступило в Редакцию  
24 февраля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 12  
12

26 июня 1989 г.

### ФАЗОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ИОНИЗАЦИИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ КВАДРУПОЛЬНОМ ПОЛЕ

В.А. Е л о х и н, С.В. П р о т о п о п о в,  
А.Ф. К у з ь м и н, С.Е. Р я б о в

Квадрупольный масс-анализатор является одним из наиболее широко используемых анализаторов в масс-спектрометрии [1]. Существенный недостаток анализаторов такого типа заключается в наличии краевых полей, в которых происходит потеря ионов; особенно такие потери велики при прохождении тяжелых ионов через входное краевое поле [1]. Радикальный способ исключения такого недостатка заключается в проведении процесса ионизации непосредственно в квадрупольном высокочастотном поле, т.е. внутри масс-анализатора [2]. В настоящей работе впервые реализован такой способ, основанный на методе лазерной ступенчатой ионизации. Исследованы зависимости пропускания ионов квадрупольным масс-фильтром от фазы зарождения ионов по отношению к фазе высокочастотного (ВЧ) поля, проведено сравнение пропускания анализатора при ионизации внутри ВЧ поля и при традиционной ионизации в источнике ионов.

Исследования проводились на экспериментальной установке, описанной в работе [3]. Использовался квадрупольный масс-спектрометр МС-7302 и перестраиваемый лазер на красителях ЛЖИ-501, накачиваемый лазером на  $Nd^{+}$  ИАГ ЛТИ-401. Излучение лазера на красителях фокусировалось в межэлектродной области на оси квадрупольного анализатора вне входного краевого поля. Исследования