

**Введение.**

Открытие метода сканирующей силовой микроскопии (ССМ) [1] после сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) [2] явилось новым этапом в развитии этого направления, открывающим широкие возможности в исследовании поверхности и микрообъектов независимо от электропроводности образца [3, 4, 5].

Решить проблемы, связанные с получением истинного атомного разрешения в режиме АСМ удалось с разработкой динамической (резонансной) моды. Этот термин происходит из принципа измерений, в котором кантилевер в процессе сканирования поддерживается в режиме генерации на одной из собственных частот. Обычно для измерений используется 1-я гармоника колебаний  $\omega$ .

Дальнейшие успехи применения динамической моды были связаны с созданием сверхвысоковакуумных комплексов со сканирующими зондовыми микроскопами. Это позволило, с одной стороны, создать условия для прецизионного контроля за состоянием поверхности образцов на атомарном уровне, а с другой – существенно повысить чувствительность метода за счет увеличения добротности колебаний зонда в вакууме. Выражение для минимального регистрируемого изменения силового градиента было получено в работе [6]:

$$\Delta K_m = \sqrt{\frac{4K_L kTB}{\pi v_0 Q A_0^2}}, \quad (I)$$

где  $\Delta K_m$  – минимальный регистрируемый градиент сил;  $B$  – полоса пропускания измерительного контура;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $v_0$  – резонансная частота колебаний кантилевера;  $Q$  – добротность кантилевера.

Как видно из (I), увеличение добротности кантилевера приводит к повышению чувствительности, однако, при этом увеличивается время измерения, поскольку, как известно, постоянная времени отклика ( $\tau$ ) линейно увеличивается с увеличением  $Q$  ( $\tau = \frac{2Q}{\omega_0}$ ). Оценка реальных значений  $\tau$  дает величины (0,1–1) сек., что делает затруднительными измерения, если в качестве регистрирующего сигнала использовать амплитуду.

Решение этой проблемы было предложено в работе [6]. В отличие от метода модуляции амплитуды авторы использовали метод модуляции частоты, в котором кантилевер осциллирует в автоколебательном режиме с постоянной амплитудой. Информационным сигналом о силовом поле образца является сдвиг частоты, который задается программно. В этом случае отклик частотного детектора не зависит от  $Q$ , что делает этот метод очень перспективным для измерения малых сил (в т. ч. электростатических, магнитных).

#### **Экспериментальные результаты и обсуждение.**

В данной работе изложены первые экспериментальные результаты по исследованию динамической моды на сверхвысоковакуумном комплексе СЗМ «Solver P7 – SPM UHV – MDT» (<http://www.ntmdt.ru>). Комплекс представляет из себя многокамерную установку, состоящую из аналитического модуля СЗМ(STM/AFM), и модуля подготовки / загрузки образцов и зондов.

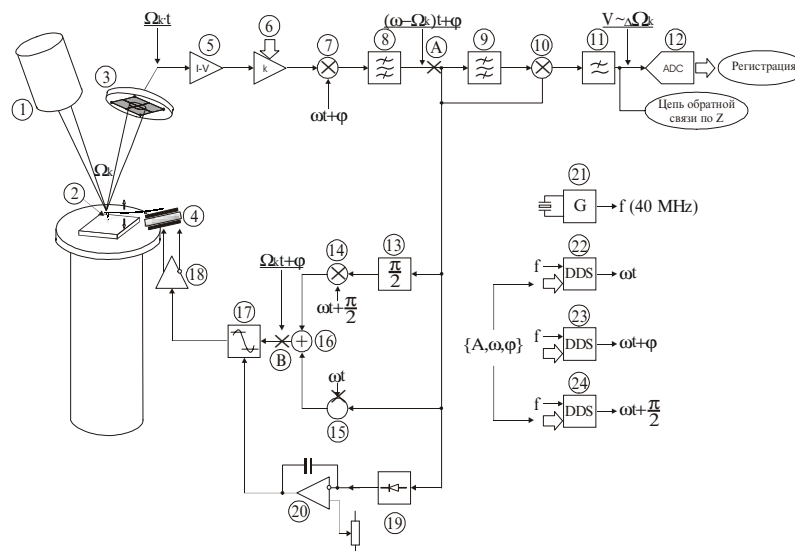
Камеры имеют индивидуальные системы откачки на основе ионных и геттеро – сублимационных насосов. Остаточное давление в камерах после прогрева менее  $10^{-10}$  mBar. В камере подготовки предусмотрены следующие технологические операции по обработке поверхности образцов и зондов: 1) косвенный прогрев образцов и зондов до  $1500^{\circ}\text{C}$ ; 2) нагрев образцов током прямого накала; 3) травление поверхности образцов и зондов ионами  $\text{Ar}^{+}$  с максимальной энергией 600 эВ.

Конструкция универсальной головки СЗМ позволяет проводить измерения как в атомно-силовом, так и СТМ режиме (включая режим модификации поверхности – нанолитографию) без каких – либо конструктивных изменений.

В АСМ используется оптическая схема регистрации отклонения кантилевера. В приборе реализованы моды контактной и бесконтактной микроскопии с возможностью регистрации тока в системе зонд - образец, а также полуконтактная (теппинг) с возможностью регистрации амплитуды, фазы и частоты колебаний кантилевера, мода динамических сил, Кельвин мода, бесконтактная емкостная мода, которые реализуются в двухпроходной методике.

Многоступенчатая виброзащита прибора состоит из магнитного гасителя колебаний и пруженной подвески измерительной головки с собственной частотой  $\approx 1,5$  Гц, которые находятся непосредственно в высоковакуумном объеме. Помимо этого, конструкция платформы с кантилевером позволяет в момент грубого подвода острия к поверхности образца создать жесткую петлю с блоком сканера, на котором крепится образец, для понижения уровня паразитных колебаний кантилевера и образца.

С целью реализации методов амплитудной и частотной модуляции в базовом электронном блоке « Solver-P7» (7) была создана новая система, позволяющая реализовать идеи, изложенные в работе (6).



**Блок-схема системы с частотной модуляцией.**

Эта система предназначена для: 1 - регистрации сдвига частоты собственных колебаний кантилевера при сканировании поверхности либо в режиме  $Z = \text{const}$ , либо на втором проходе двухпроходной методики с поддержанием постоянной высоты над измеренным профилем. 2 - регистрации профиля поверхности при поддержании постоянного сдвига относительно частоты свободных колебаний кантилевера путем использования напряжения пропорционального сдвигу частоты в качестве сигнала обратной связи по координате  $Z$  сканера.

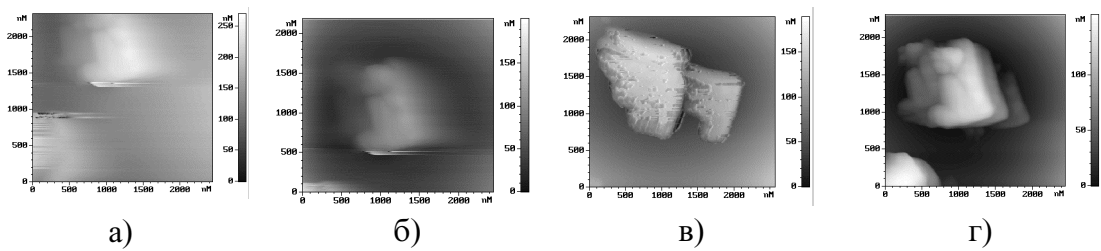
Принцип работы схемы заключается в следующем. Луч лазера 1, фокусируемый на кантилевере 2, попадает на 4-х секционный фотоприемник 3. Колебания кантилевера возбуждаются пьезокерамическим элементом 4, так что ток на выходе фотоприемника модулирован собственной частотой кантилевера  $\omega_0$ . На выходе преобразователя  $I - V$  5 возникает напряжение той же частоты. Усилитель с управляемым коэффициентом усиления 6 регулирует величину петлевого усиления, определяя таким образом амплитуду колебаний кантилевера. С выхода усилителя 6 сигнал подается на умножитель 7, где он смешивается с сигналом, поступающим с цифрового синтезатора 23 и имеющего частоту на 30 кГц выше частоты  $\omega_0$ , и управляемый сдвиг фазы относительно синтезаторов 22 и 24 –  $\varphi$ . Полосовой фильтр 8 обрезаает суммарную частоту, пропуская  $U \sim \cos \{(\omega - \omega_0)t + \varphi\}$ , где  $\omega - \omega_0 \approx 30 \text{ кГц}$ . Цепь измерения сдвига частоты выполнена по стандартной схеме и состоит из фазовращателя 9 (полосовой фильтр), умножителя 10 и фильтра низких частот 11, напряжение на выходе которого пропорционально сдвигу частоты входного сигнала относительно частоты (30 кГц), на которой фазовращатель 9 обеспечивает сдвиг фазы на  $\pi/2$ . В диапазоне сдвига на  $\pm 1 \text{ кГц}$  эта зависимость достаточно линейна. Полученное напряжение регистрируется АЦП 12 или подается в цепь обратной связи по координате  $Z$  пьезосканера 25. Напряжение из точки А блок-схемы подается так же в

цепь обратной связи по частоте и с помощью фазосдвигателя на  $\pi/2$  13, умножителей 14 и 15, цифровых синтезаторов 22 ( $\omega t$ ) и 24 ( $\omega t - \pi/2$ ), сумматора 16 в точке В восстанавливается исходная частота  $\omega_0$  и получается напряжение  $U \sim \cos \{ \omega_0 t + \varphi \}$ . Таким образом, имеется возможность цифрового управления петлевым усилением К (усилитель 6), петлевым сдвигом фазы (синтезатор 23) и путем изменения частоты  $\omega$  синтезаторов 22, 23 и 24 использовать кантилеверы, собственная частота которых лежит в диапазоне 40 – 500 кГц. С помощью выпрямителя 19, интегратора 20 и управляющего ограничителя 17 осуществляется стабилизация амплитуды колебаний кантилевера. Амплитуда регулируется тем же усилителем 6, что и петлевой коэффициент усиления. Замыкается цепь обратной связи с помощью буфера 18.

Основные измерения проводились в «теппинг» моде (ТМ) и в моде с частотной модуляцией (ЧМ), с использованием Si – кантилеверов на сколотых *in situ* образцах Ga As (011). Перед измерениями кантилеверы прогревались до  $T=600^\circ\text{C}$  и экспонировались под ионным пучком  $\text{Ag}^+$  с энергией 500 эВ и током  $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>. Отличительной особенностью топографических изображений, сделанных в ТМ, является слабая зависимость разрешающей способности метода от параметров измерений после контакта острия с поверхностью и достижения равновесного состояния. Очевидно, что причиной этого является существенное уменьшение добротности кантилевера. Действительно, измерения показали, что добротность с величины  $Q=20000-30000$  для свободных колебаний в вакууме, падает на 1–2 порядка, если амплитуда колебаний превышает расстояние от поверхности до покоящегося кантилевера.

В отличие от ТМ, метод ЧМ является бесконтактным. В данном случае существует возможность зондировать силовое поле образца в направлении Z. Это обстоятельство позволяет, подобрав оптимальное значение  $Z_0$  (то есть  $\Delta\omega$ ) и A реализовать максимальную разрешающую способность. Поскольку в методе ЧМ в процессе измерений не изменяется максимальная добротность кантилевера, этот метод обладает большей чувствительностью к величине основных измерительных параметров A и  $\Delta\omega$ .

На рисунке 1 в качестве иллюстрации приведены топографические изображения Ga As (011). Как видно из этих изображений, наблюдается высокая прецизионность выбора оптимальных параметров в методе ЧМ. Кроме того, разрешающая способность, о которой можно судить по резкости границ, выше в случае ЧМ, чем в ТМ.



**Рис1. Топографическое изображение дефекта на поверхности GaAs (011). а, б, в- метод ЧМ,  $\Delta\nu = 20, 35$  и  $60$  Гц,  $A=500\text{\AA}$ , соответственно; г - метод ТМ.**



**Рис.2. Топографическое изображение скола GaAs (011) методом ЧМ: а- непосредственно после скола, б- после пяти дней выдержки в аналитической камере при  $P = 5 \times 10^{-10}$  mBar.**

Большая чувствительность к потенциальному рельефу в методе ЧМ иллюстрируется на рис2. При выборе кантилеверов большое значение имеет выбор параметров  $K_L$  и  $\nu_0$ . Известно, что:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta K}{2K_L} . \quad (\text{II})$$

Из(II) видно, что для наибольшего изменения частоты предпочтительнее кантилеверы с меньшим значением  $K_L$  и большим  $\nu_0$ . В наших экспериментах были использованы кантилеверы с  $\nu_0 = 180 - 300 \text{ кГц}$  и  $K_L = 5 - 20 \text{ N/m}$ .

### **Литература.**

1. G.Binnig, Ch.Gerber, and C.F.Quate. Phys.Rev.Lett.56(1986)930.
2. G.Binnig, H.Rhorer, Ch.Gfrber, and Weibel Phys.Rev.Lett.49(1982)57.
3. P. Gutner.J.Vac.Sci.Tech.B14(1996)2438.
4. F.J.Giessibl. Phys.Rev. B56(1997)16010.
5. F.J.Giessibl. J.Appl.Phys.33(1994)3726.
6. T.R.Albreht,P.Grutter,D.Horne, and Rugan.J.Apll.Phys.69(1991)668.
7. В.А.Быков,М.И.Лазарев,С.А.Саунин.Сенсорные системы, 12,№1(1998)99.