

Мода динамических сил в СЗМ и результаты исследований.

В.А. Быков, С.Ф. Кацур, Б.К. Медведев, С.А. Саунин, Д.Ю. Соколов.

Государственный научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина, компания НТ- МДТ, 103460 Москва-Зеленоград, Гос.НИИФП

тел. (095) 535-03-05, Факс (095) 535-64-10, e-mail: spm@ntmdt.ru,

http://www.ntmdt.ru

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 кантileвер в процессе сканирования поддерживается в режиме генерации на одной из собственных частот. Обычно для измерений используется 1-я гармоника колебаний ω_0 .

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 ΔK_m – минимальный регистрируемый градиент сил; B – полоса пропускания измерительного контура; k – постоянная Больцмана; T – температура; v_0 – резонансная частота колебаний кантileвера; Q – добротность кантileвера.

Как видно из (I), увеличение добротности кантileвера приводит к повышению чувствительности, однако, при этом увеличивается время измерения, поскольку, как известно, постоянная времени отклика (τ) линейно увеличивается с увеличением Q ($\tau = \frac{2Q}{\omega_0}$). Оценка реальных значений τ 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 кантителевер 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.

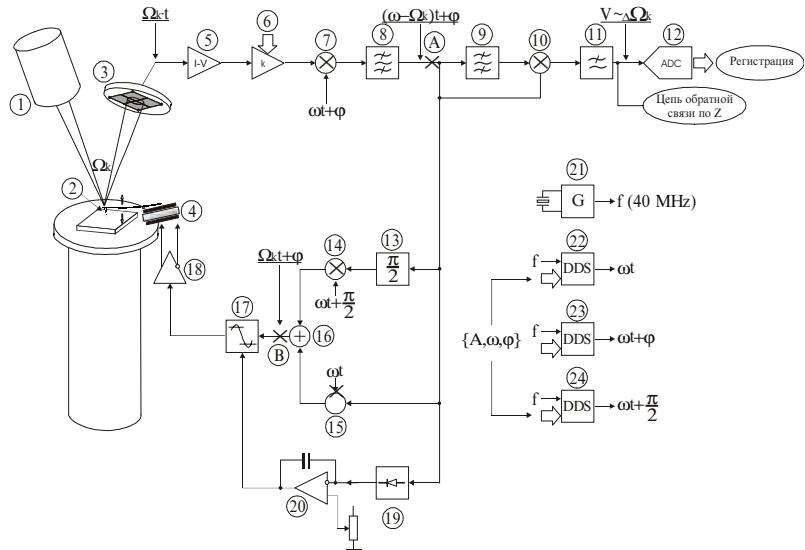
Камеры имеют индивидуальные системы откачки на основе ионных и геттеро-сублимационных насосов. Остаточное давление в камерах после прогрева менее 10^{-10} mBar. В камере подготовки предусмотрены следующие технологические операции по обработке поверхности образцов и зондов: 1) косвенный прогрев образцов и зондов до 1500°C ; 2) нагрев образцов током прямого накала; 3) травление поверхности образцов и зондов ионами 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 кантителевера. 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 кантителевера, мода динамических сил, Кельвин мода, бесконтактная емкостная мода, которые реализуются в двухпроходной методике.

Многоступенчатая виброзащита прибора состоит из магнитного гасителя колебаний и пружинной подвески измерительной головки с собственной частотой $\approx 1,5$ Гц, которые находятся непосредственно в высоковакуумном объеме. Помимо этого, конструкция платформы с кантителевером позволяет в момент грубого подвода остряя к поверхности образца создать жесткую петлю с блоком сканера, на котором крепится образец, для понижения уровня паразитных колебаний кантителевера 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 ω_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 ω_0 , и управляемый сдвиг фазы относительно синтезаторов 22 и 24 – ϕ . Полосовой фильтр 8 обрезает суммарную частоту, пропуская $U \sim \cos \{(\omega - \omega_0) t + \phi\}$, 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 (ωt) и 24 ($\omega t - \pi/2$), сумматора 16 в точке В восстанавливается исходная частота ω_0 и получается напряжение $U \sim \cos \{\omega_0 t + \varphi\}$. Таким образом, имеется возможность цифрового управления петлевым усилением K (усилитель 6), петлевым сдвигом фазы (синтезатор 23) и путем изменения частоты ω синтезаторов 22, 23 и 24 использовать кантителеверы, собственная частота которых лежит в диапазоне 40 – 500кГц. С помощью выпрямителя 19, интегратора 20 и управляющего ограничителя 17 осуществляется стабилизация амплитуды колебаний кантителевера. Амплитуда регулируется тем же усилителем 6, что и петлевой коэффициент усиления. Замыкается цепь обратной связи с помощью буфера 18.

Основные измерения проводились в «теппинг» mode (TM) и в mode с частотной модуляцией (ЧМ), с использованием Si – кантителеверов на сколотых *in situ* образцах Ga As (011). Перед измерениями кантителеверы прогревались до $T=600^0$ С и экспонировались под ионным пучком Ar^+ с энергией 500 эВ и током 10^{-8} А/см². Отличительной особенностью топографических изображений, сделанных в TM, 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 кантителевера. 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 кантителевера.

В отличие от TM, 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 кантителевера, 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 TM.

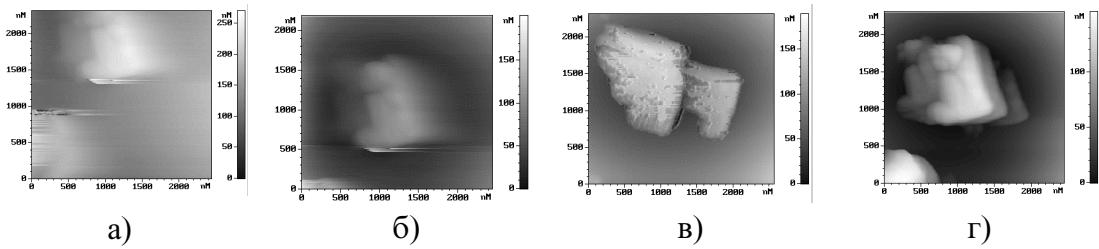


Рис1. Топографическое изображение дефекта на поверхности GaAs (011). а, б, в- метод ЧМ, $\Delta v = 20, 35$ и 60 Гц, $A=500$ А, соответственно; г - метод ТМ.

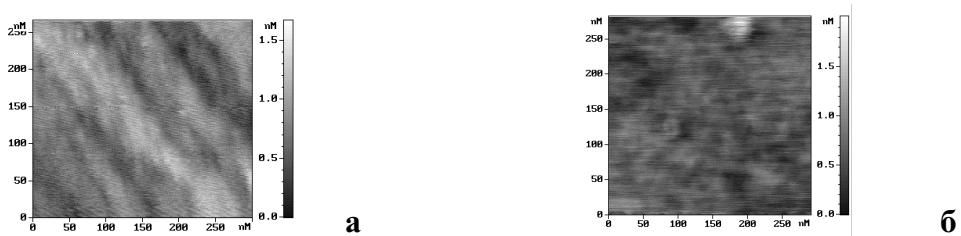


Рис2. Топографическое изображение скола GaAs (011) методом ЧМ: а- непосредственно после скола, б- после пяти дней выдержки в аналитической камере при $P = 5 \times 10^{-10}$ мБар.

Большая чувствительность к потенциальному рельефу в методе ЧМ иллюстрируется на рис2. При выборе кантileверов большое значение имеет выбор параметров K_L и v_0 . Известно, что:

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

Из(II) видно, что для наибольшего изменения частоты предпочтительнее кантileверы с меньшим значением K_L и большим - v_0 . В наших экспериментах были использованы кантileверы с $v_0 = 180 - 300$ кГц и $K_L = 5 - 20$ Н/м.

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.Appl.Phys.69(1991)668.
7. В.А.Быков, М.И.Лазарев, С.А.Саунин. Сенсорные системы, 12, №1(1998)99.