

Емкостная методика сканирующей зондовой микроскопии в атмосфере воздуха

И.И.Бобринецкий, В.В.Лосев

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

В основе бесконтактного емкостного метода лежит действие электродинамических сил между кантилевером и образцом. Если кантилевер и образец изготовлены из проводящего материала (поверхностная проводимость не требуется), то их можно замкнуть в электрическую цепь и, прикладывая постоянное U_0 и переменное $U_1 \sin \omega t$ напряжение к кантилеверу, можно инициировать электростатическое притяжение между образцом и зондом. Схема системы кантилевер–образец представлена на рис.1.

Сила, с которой кантилевер притягивается к поверхности, равна: $F = -\frac{\partial E}{\partial Z} = -\frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C}{\partial Z}$, где Z – расстояние от иглы кантилевера до поверхности образца. Эта сила вызывает изменение амплитуды колебаний кантилевера, которые и регистрируются в бесконтактном режиме работы СЗМ [1]. Полное напряжение между образцом и кантилевером равно $U = (U_0 - \varphi(x, y)) + U_1 \cdot \sin(\omega t)$, где $\varphi(x, y)$ – поверхностный потенциал в точке измерения. Тогда сила, действующая между образцом и кантилевером, будет равна:

$$F_z = -\left[\frac{1}{2} \left((U_0 - \varphi(x, y))^2 + \frac{1}{2} U_1^2 \right) + (U_0 - \varphi(x, y)) U_1 \cdot \sin(\omega t) - \frac{1}{4} U_1^2 \cdot \cos(2\omega t) \right] \frac{\partial C}{\partial Z}.$$

Изменение составляющей силы

$$F_{z1} = -\left[\frac{1}{2} (U_0 - \varphi(x, y) + U_1^2)^2 \right] \frac{\partial C}{\partial Z}$$

обусловлено как изменением емкости, так и изменением поверхностного потенциала. Это затрудняет интерпретацию результатов измерений.

Вторая составляющая силы равна:

$$F_{z2} = -[(U_0 - \varphi(x, y)) U_1 \sin(\omega t)] \frac{\partial C}{\partial Z}.$$

Составляющая силы F_{z3} на второй гармонике

$$F_{z3} = \left[\frac{1}{4} U_1^2 \cos(2\omega t) \right] \frac{\partial C}{\partial Z}$$

зависит только от производной емкости системы от координаты между электродами и используется для измерений в емкостной методике. Электрическая емкость системы кантилевер – образец складывается из двух емкостей, включенных последовательно: емкости зазора C_z , зависящей от расстояния кантилевер – образец, и поверхностной емкости $C_{x,y}$. Емкостная методика особенно эффективна при исследовании наноразмерных проводящих

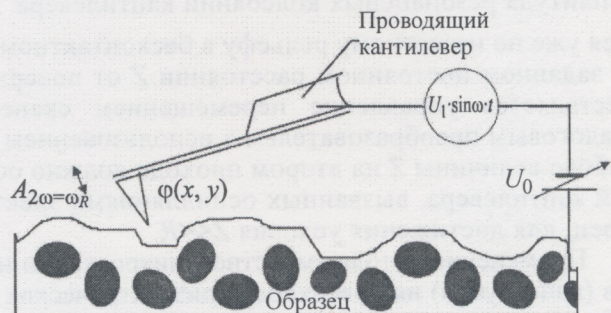


Рис.1. Схема измерения бесконтактным емкостным методом образца, содержащего различные объемные фазы

включений в диэлектрической пленке, расположенной на электроде. Емкость системы определяется выражением

$$C = \frac{C_z C_{x,y}}{C_z + C_{x,y}}$$

Ранее была развита методика для чистых поверхностей, не покрытых адсорбатом, т.е. для поверхностей, находящихся в глубоком вакууме [1]. Для ее строгой реализации требуется условие $Z \gg R$, где R – радиус острия кантилевера. Иначе говоря, емкость межэлектродного зазора должна быть постоянной. Однако такое условие существенно понижает латеральное разрешение метода, которое в этом случае по каждой координате пропорционально Z . Наличие адсорбата воздуха на электродах, толщина которого составляет несколько нанометров [2] и который состоит в основном из воды с диэлектрической проницаемостью больше единицы, существенно меняет диэлектрическую проницаемость межэлектродного зазора. При $Z \ll R$, когда латеральное разрешение определяется радиусом кантилевера и является наивысшим, межэлектродная емкость определяется как

$$C(Z) = \frac{\varepsilon S}{4\pi[\varepsilon Z - d(\varepsilon - 1)]},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость адсорбата; d – его совокупная толщина между электродами ($Z > d$); S – эффективная площадь поверхности кантилевера.

В этом случае амплитуда резонансных колебаний кантилевера, инициированная переменным электрическим полем с частотой, равной половине резонансной, будет равна:

$$A_{\omega_R} \sim \frac{U_1^2}{4} \frac{\partial C}{\partial Z} \approx \frac{U_1^2}{(Z-d)^2} \frac{C_{x,y}^2}{(C_z + C_{x,y})^2}.$$

Здесь учтено, что диэлектрическая проницаемость адсорбата $\varepsilon \ll 1$ и амплитуда колебаний зависит только от совокупной толщины адсорбата. Величина d остается постоянной при неизменных внешних условиях (относительной влажности и атмосферном давлении). Из формулы можно видеть, что чувствительность емкостной методики тем выше, чем меньше межэлектродный зазор. Очевидно, что амплитуда колебаний кантилевера не должна превышать межэлектродный зазор: $A_{\omega_R} < Z$.

Отметим, что емкостная методика позволяет изучать изменение величины d между проводящими электродами в зависимости от внешних условий, что следует из соотношения:

$$A_{\omega_R} \sim \frac{U_1^2}{(Z-d)^2}.$$

Лучшим аппаратным средством для реализации данной модели в СЗМ является двухпроходной метод. В двухпроходном методе каждая строка сканируется дважды: во время первого прохода строки измеряется рельеф в обычном полуконтактном режиме, а при повторном – амплитуда резонансных колебаний кантилевера A_{ω_R} . При этом второй проход осуществляется уже по известному рельефу в бесконтактном режиме, когда игла кантилевера проходит на заданном постоянном расстоянии Z от поверхности. Синхронно со сканированием осуществляется управление перемещением сканера по нормали к поверхности цифроаналоговым преобразователем с использованием данных из памяти компьютера. Решение о выборе величины Z на втором проходе должно основываться, исходя из амплитуды колебаний кантилевера, вызванных осцилляциями электрического поля в зазоре кантилевер – образец, для достижения условия $Z \ll R$.

Применение метода емкостной микроскопии на примере обнаружения проводящих объектов (нанотрубок) на поверхности диэлектрических подложек было описано в [3]. В настоящей работе показано, что методика емкостной микроскопии может быть использована при исследовании объектов, содержащих в объеме фазы с различными электрическими свойствами. На рис.2 показано АСМ-изображение поверхности полимерной пленки, содержащей проводящую фазу наночастиц шунгита. Можно видеть, что в емкостном режиме обнаруживаются

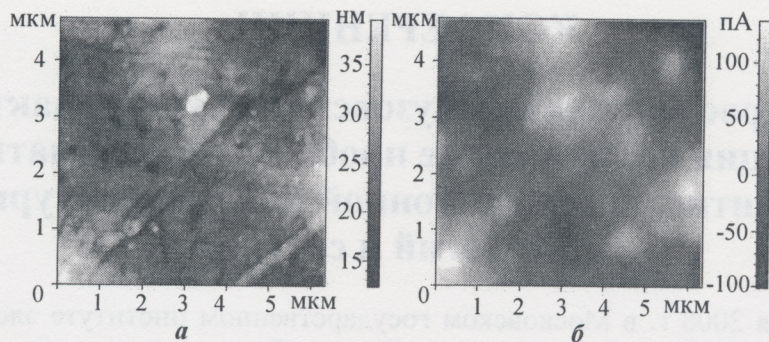


Рис.2. АСМ-изображение поверхности полимера с распределенной в объеме фазой шунгита: *а* – топография, *б* – изменение амплитуды колебаний кантилевера в емкостном режиме

фрагменты более электрически активных нанобразований шунгита, распределенных в приповерхностной контактной области полимерной пленки.

Литература

1. **Быков В.А., Лосев В.В., Саунин С.А.** Емкостная методика сканирующей силовой микроскопии в исследовании распределения легирующей примеси в кремнии // Материалы Всероссийского совещания «Зондовая микроскопия – 1999» (Нижний Новгород, 10–13 марта 1999 г.). – ИФН РАН. – 1999. – С. 134–140.
2. **Булатов А.Н., Хартов С.В.** Исследование адсорбата воздуха на твердых подложках методами атомно-силовой микроскопии // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 4. – С. 9–17.
3. **Бобринецкий И.И., Неволин В.К., Строганов А.А.** «Засвечивание» углеродных нанотрубок в атомно-силовом микроскопе // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 3. – С. 83–85.

Поступило 28 февраля 2008 г.

Бобринецкий Иван Иванович – кандидат технических наук, докторант Учебно-научного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, нанотехнология и наноэлектроника.

Лосев Виктор Васильевич – кандидат физико-математических наук, профессор кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, оптика.

СЕМИНАРЫ

11 ноября 2008 г. Московский государственный институт электронной техники (технический университет) и компания Cadence провели семинар «**Разработка цифро-аналоговых СБИС**». Семинар, адресованный разработчикам аналоговых и цифровых схем, топологам, инженерам по верификации, а также студентам и аспирантам соответствующих специальностей, проходил в Клубе университета под руководством технических специалистов и представителей компании Cadence.

В семинаре приняли участие 83 представителя крупнейших фирм, университетов и организаций, среди которых Freescale Semiconductor, «Микрон», «Ангстрем», Unique IC's, «Пульсар», МИФИ, МИРЭА и многие другие.