

Методы сканирующей зондовой микроскопии

Тема 4. Электросиловая микроскопия

2.3. Электросиловая микроскопия

В электросиловой микроскопии для получения информации о свойствах поверхности используется электрическое взаимодействие между зондом и образцом. Рассмотрим систему, состоящую из зондового датчика, у которого зонд имеет проводящее покрытие, и образца, представляющего собой тонкий слой материала на хорошо проводящей подложке.

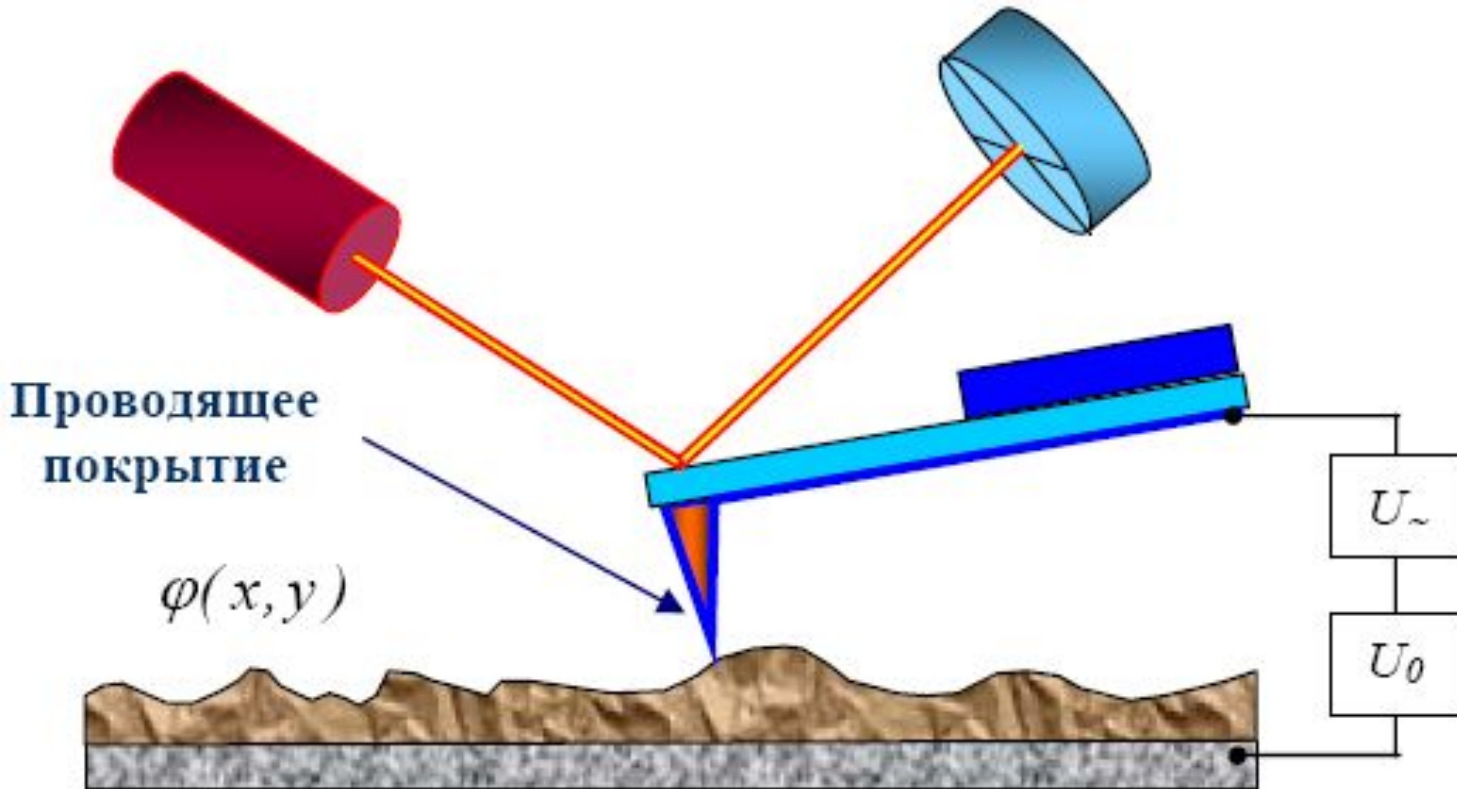


Рис. 84. Схема измерения электрического взаимодействия зонда с образцом

Пусть между зондом и образцом подано постоянное напряжение U_0 и переменное напряжение $U_{\sim} = U_1 \cdot \sin(\omega t)$. Если тонкий слой на подложке представляет собой полупроводник или диэлектрик, то он может содержать поверхностный заряд, так что на поверхности образца существует распределение потенциала $\varphi(x, y)$. Напряжение между зондом и поверхностью образца можно представить в виде

$$U = U_0 + U_1 \sin(\omega t) - \varphi(x, y).$$

Система зонд – образец обладает некоторой электрической емкостью C , так что энергия такой системы может быть представлена в следующем виде:

$$E = \frac{CU^2}{2}.$$

Тогда электрическая сила взаимодействия зонда и образца равна

$$\vec{F} = -\text{grad}(E).$$

А ее Z-компонента может быть представлена в виде

$$F_z = -\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C}{\partial z}.$$

Таким образом, Z-компонента электрической силы, действующей на зонд со стороны образца, равна

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

Из последнего выражения следует, что сила взаимодействия имеет три составляющие:

постоянную составляющую $F_{z(\omega=0)} = - \left\{ \frac{1}{2} \left((U_0 - \varphi(x, y))^2 + \frac{1}{2} U_1^2 \right) \right\} \times \frac{\partial C}{\partial z}$;

составляющую на частоте ω $F_{z(\omega)} = - [(U_0 - \varphi(x, y)) \cdot U_1 \sin(\omega t)] \times \frac{\partial C}{\partial z}$;

составляющую на частоте 2ω $F_{z(2\omega)} = \left\{ \frac{1}{4} U_1^2 \cos(2\omega t) \right\} \times \frac{\partial C}{\partial z}$.

Детектирование амплитуды колебаний кантилевера на частоте 2ω позволяет исследовать распределение вдоль поверхности величины $C'_z(x, y)$ производной от емкости по координате z (так называемая емкостная микроскопия [39]). С помощью этого метода можно изучать локальные диэлектрические свойства приповерхностных слоев образцов. Для получения высокого разрешения в данной методике необходимо, чтобы электрическая сила в системе зондовый датчик - образец определялась, в основном, взаимодействием между зондом и поверхностью.

Сила взаимодействия зонда с поверхностью на основе простой модели плоского конденсатора может быть представлена в виде

$$F_{PS} = -\frac{1}{2}U^2 \frac{\partial C}{\partial z} \cong -\frac{1}{2}\alpha U^2 \frac{\pi R^2}{h^2},$$

где α – постоянная величина, R – характерный радиус закругления кончика зонда, h – расстояние зонд-поверхность (или толщина пленки диэлектрика на проводящей подложке). С другой стороны сила, действующая на кантилевер со стороны образца:

$$F_{CS} = -\frac{1}{2}U^2 \frac{\partial C}{\partial z} \cong -\frac{1}{2}\alpha U^2 \frac{LW}{H^2},$$

где α – постоянная величина, L - длина кантилевера, W - ширина кантилевера, H - расстояние до поверхности (определяется размерами зонда). Из условия $F_{PS} > F_{CS}$ следует:

$$h < \sqrt{\frac{\pi R^2 H^2}{LW}}.$$

Отсюда для типичных значений параметров зондовых датчиков ($L \sim 100$ мкм, $W \sim 30$ мкм, $H \sim 30$ мкм, $R \sim 10$ нм) можно получить следующую оценку: $h < 10$ нм.

Поскольку сама величина $\frac{\partial C}{\partial z}$ зависит от расстояния зонд-образец, для исследования диэлектрических свойств образцов применяется двухпроходная методика. В каждой строке сканирования производится следующая процедура. На первом проходе с помощью пьезовибратора возбуждаются колебания кантилевера на частоте, близкой к резонансной частоте ω_0 , и снимается АСМ изображение рельефа в "полуконтактном" режиме. Затем зондовый датчик отводится от поверхности на расстояние z_0 , между зондом и образцом подается переменное (на частоте $\omega = \omega_0$) напряжение, и осуществляется повторное сканирование (рис. 85). На втором проходе датчик движется над поверхностью по траектории, повторяющей рельеф образца. Поскольку в процессе сканирования локальное расстояние между зондовым датчиком и поверхностью в каждой точке постоянно, изменения амплитуды колебаний кантилевера на частоте 2ω будут связаны с изменением емкости системы зонд-образец вследствие изменения диэлектрических свойств образца.

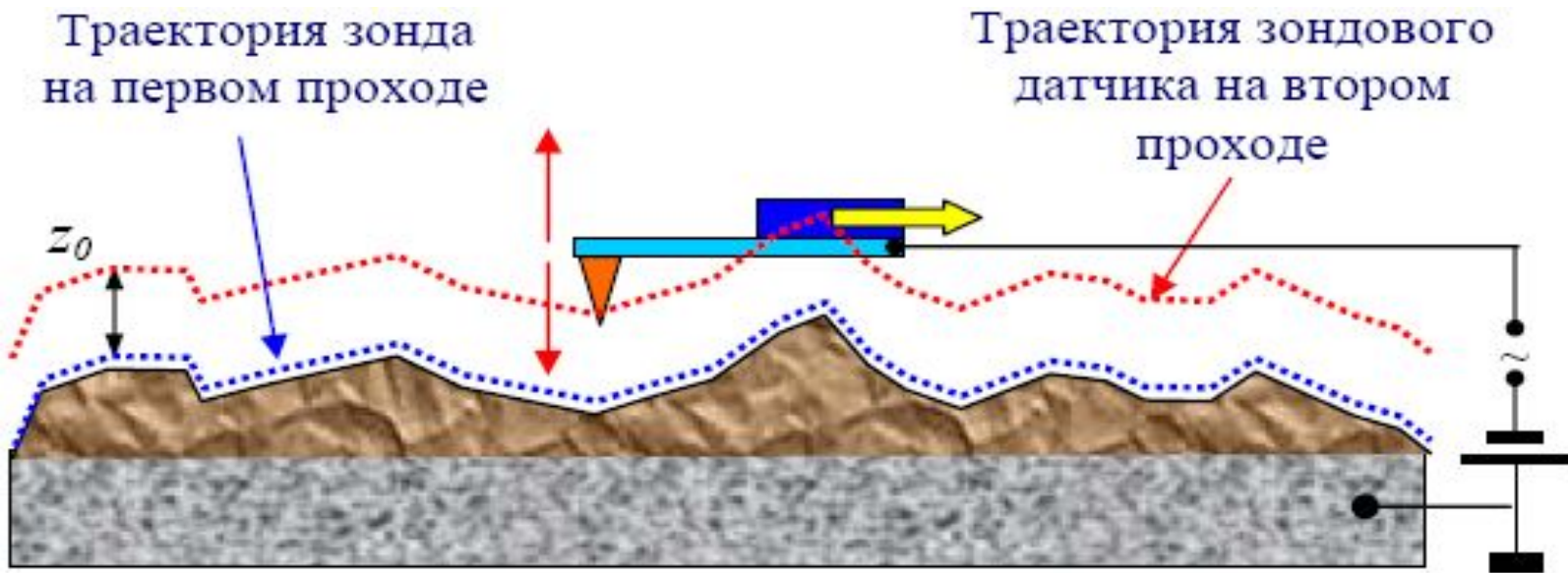


Рис. 85. Двух-проходная методика ЭСМ

Детектирование сигнала на частоте ω позволяет изучать распределение поверхностного потенциала $\phi(y, x)$ (так называемый метод Кельвина). Для этого при сканировании образца на втором проходе в каждой точке производится следующая процедура. С помощью перестраиваемого источника постоянного напряжения подбирается величина U_0 таким образом, чтобы амплитуда колебаний кантилевера на частоте ω становилась равной нулю. Это происходит в том случае, если $U_0 = \phi(y, x)$ в данной точке поверхности. На рис. 86. в качестве примера приведены АСМ изображение рельефа поверхности и распределение поверхностного потенциала для композитной пленки, содержащей азобензол [41]. На изображении поверхностного потенциала выделяются молекулы азобензола, имеющие сильный дипольный момент.

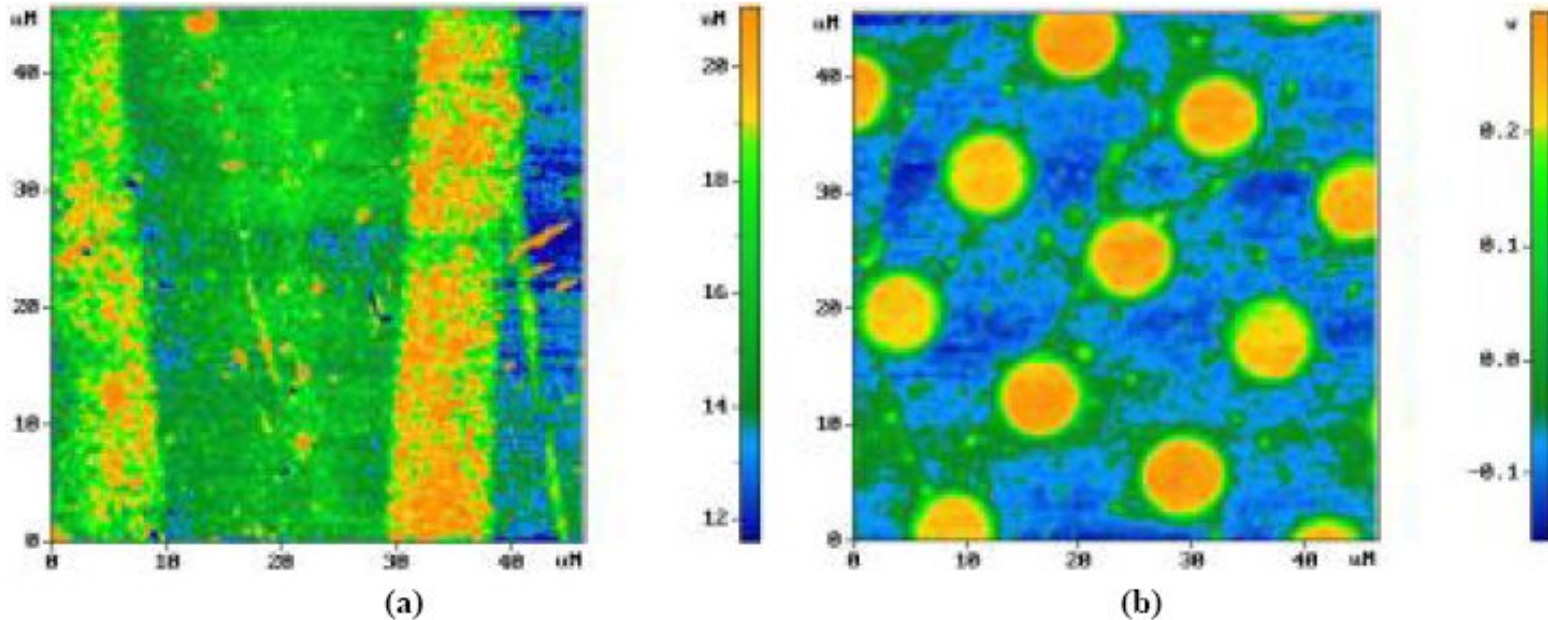


Рис. 86. Рельеф поверхности (а) и распределение поверхностного потенциала (б) пленки азобензола.