

# **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.

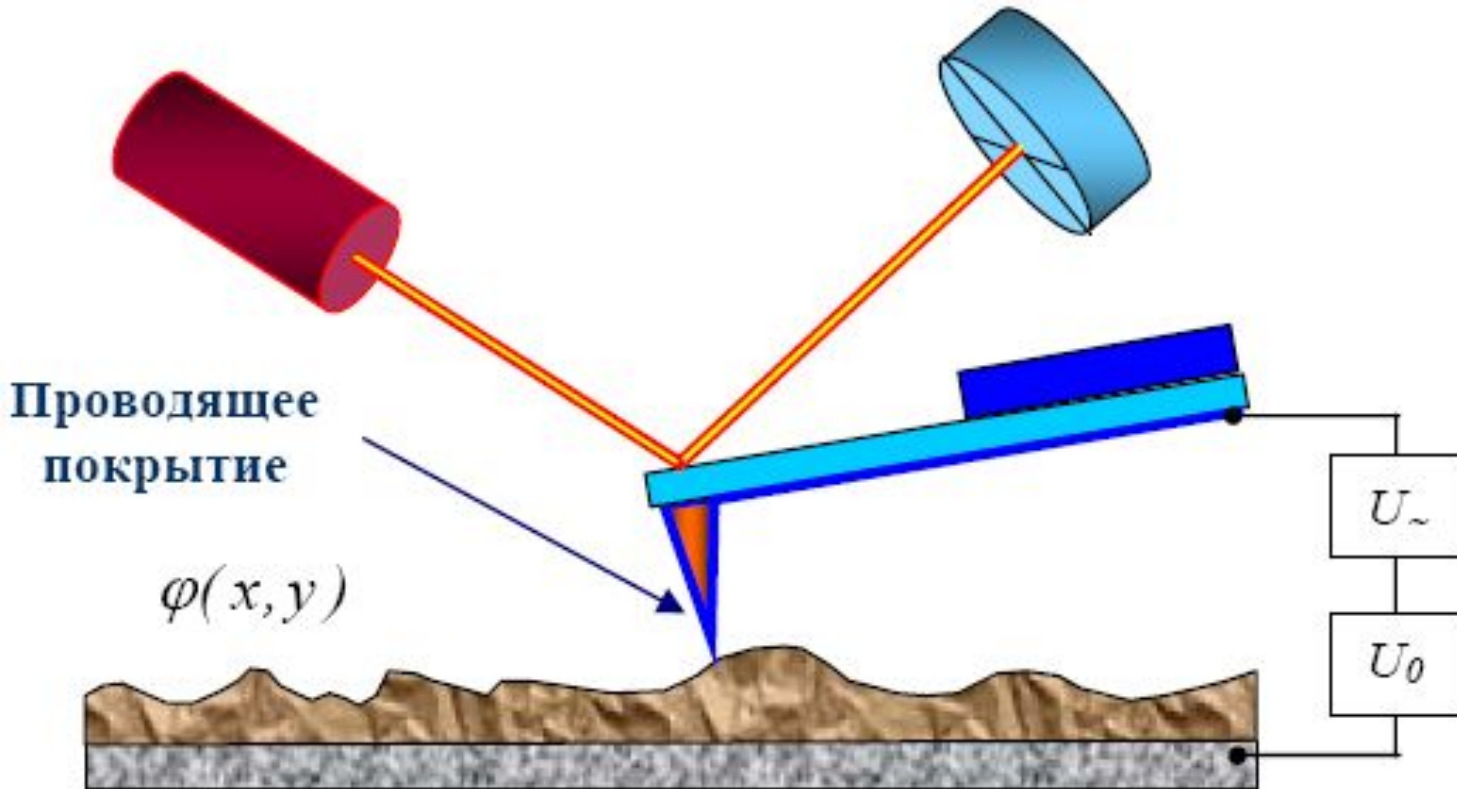


Рис. 84. Схема измерения электрического взаимодействия зонда с образцом

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

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

Детектирование амплитуды колебаний кантилевера на частоте  $2\omega$  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  $\alpha$  – 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  $\alpha$  – 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  $\omega_0$ , 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  $2\omega$  будут связаны с изменением емкости системы зонд-образец вследствие изменения диэлектрических свойств образца.

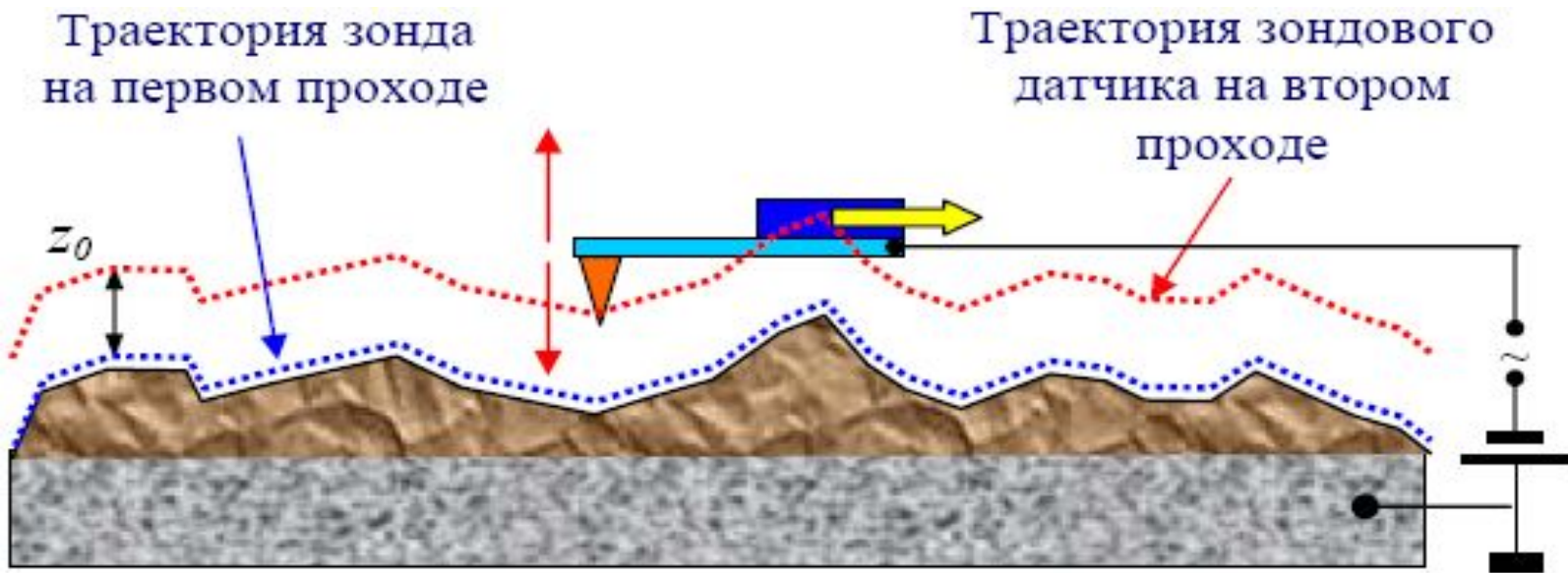


Рис. 85. Двух-проходная методика ЭСМ

Детектирование сигнала на частоте  $\omega$  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  $\omega$  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.

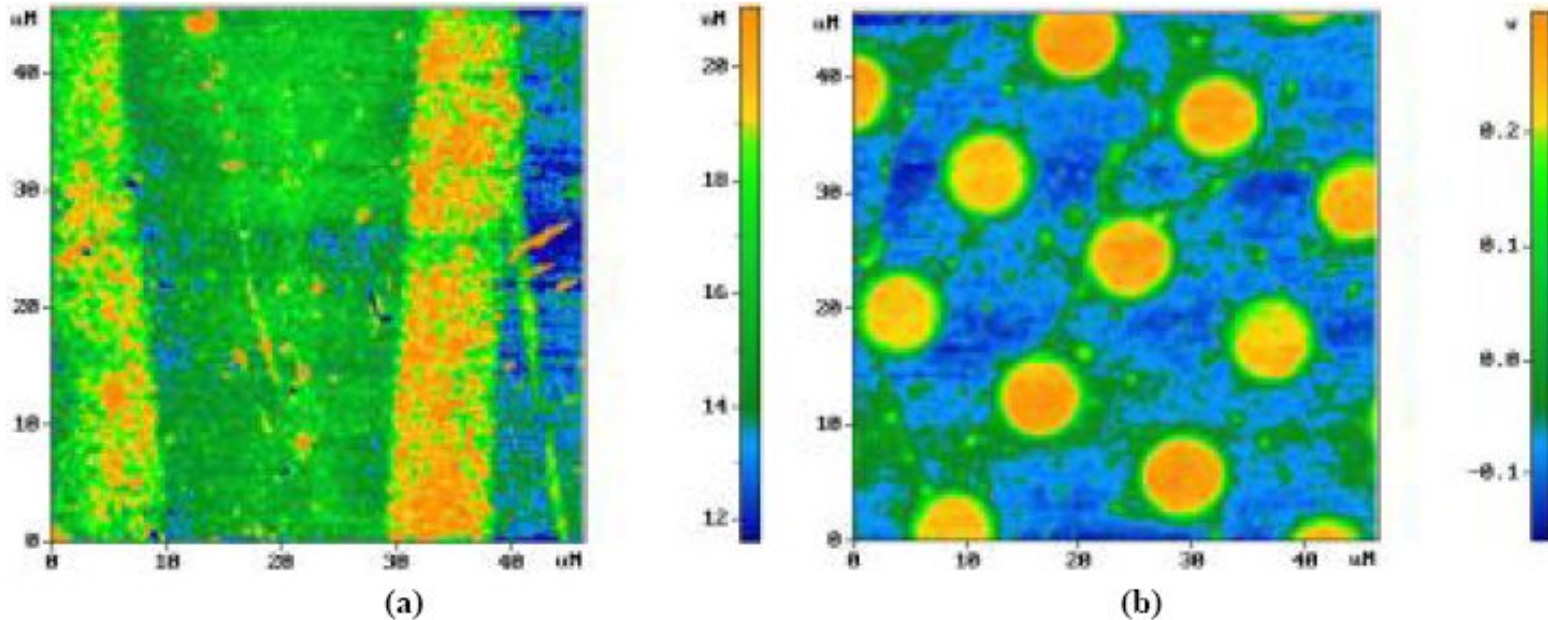


Рис. 86. Рельеф поверхности (а) и распределение поверхностного потенциала (б) пленки азобензола.