Отметим, что в других твердых растворах величина этого эффекта может стать еще заметнее, поскольку она зависит от фактора $\frac{1}{v}\frac{\partial v}{\partial c}$, входящего в выражение для $\mathbf{A_Q}\left(\mathbf{A_Q} \sim \frac{(1+\sigma)}{3(1-\sigma)}\frac{1}{v}\frac{\partial v}{\partial c}\frac{\mathbf{Q}}{Q^2}\right)$ (согласно правилу Юм-Розери, даже в неограниченных твердых растворах $\frac{1}{v}\frac{\partial v}{\partial c}=0{,}4$, в то время как для Cu—Zn $\frac{1}{v}\frac{\partial v}{\partial c}=0{,}18$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Блатт Ф. Д. Физика электронной проводимости в твердых телах. М., 1971. [2] Animalu A. O. E.//Phys. Rev. 1973. B8. P. 3542—3553. [3] Иверонова В. И., Кацнельсон А. А. Ближний порядок в твердых растворах. М., 1977. [4] Dagens L.//J. Phys. F.: Metal Phys. 1976. 6. P. 1801—1817. [5] Юрьев А. А., Ватолин Н. А.//Изв. АН СССР. Металлы. 1984. № 5. С. 44—50. [6] Силонов В. М., Скоробогатова Т. В., Кацнельсон А. А., Крисько О. В. Деп. ВИНИТИ № 4926. М., 1985.

Поступила в редакцию
09.06.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 2

УДК 537.533.35

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭМИТТЕРА НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

С. Д. Алекперов, С. И. Васильев, С. П. Молчанов

(кафедра квантовой радиофизики)

Рассмотрены условия, при которых параметры зондирующего эмиттера позволяют получить максимальное пространственное разрешение сканирующего туннельного микроскопа. Описана методика получения эмиттеров с заданными свойствами.

Среди существующих методов изучения поверхности твердых тел сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) занимает особое место, поскольку дает возможность исследовать структуру и электронные свойства поверхности в атомном масштабе [1, 2].

Принцип работы СТМ основан на явлении туннелирования электронов между проводящим острием малого радиуса (эмиттером) и исследуемой поверхностью.

Предельное пространственное разрешение СТМ определяется в основном минимальным радиусом эмиттера и его механической жесткостью. Для типичных эмиттеров [3] механическая жесткость в продольном и поперечном направлениях оказывается достаточно малой, поэтому механические, тепловые и квантовые флуктуации эмиттера могут существенно ухудшить разрешение СТМ.

В настоящей работе рассматриваются условия, при которых параметры эмиттера позволяют получить наилучшее разрешение СТМ, и описывается оптимальная методика изготовления таких эмиттеров.

Для качественной оценки радиуса острия воспользуемся теорией, изложенной в работе [4], которая дает следующее выражение для отношения амплитуд неровностей поверхности и наблюдаемого СТМ-профиля:

$$\Delta d/h_s=\exp\left[-\pi^2(d+R)/a^2K_0\right], \qquad (1)$$

где Δd — амплитуда неровностей наблюдаемого СТМ-профиля, h_s — амплитуда неровностей поверхности, d — расстояние от туннельного острия до поверхности, R — радиус туннельного острия, a — период неровностей поверхности, $K_0=(2m/\hbar^2)\Phi$, m — масса электрона, $\hbar$ — постоянная Планка, Φ — эффективная работа выхода электродов. Отношение (1) близко к единице при условии

$$d<R<K_0a^2,$$

которое определяет возможность применения СТМ для исследования топографии поверхности с заданным разрешением.

Хотя уже существуют методики получения эмиттеров для СТМ с помощью ионного травления [5], а также с использованием автоионного микроскопа Мюллера [6], наиболее доступным и освоенным методом остается метод электрохимического травления. При этом величина радиуса острия получаемого эмиттера определяется соотношением [7]:

$$R = D\sqrt{\gamma \Delta L / 4\sigma_{вр}}, \qquad (2)$$

где D — диаметр эмиттера, ΔL — длина отрывающейся части, γ — удельный вес материала, $\sigma_{вр}$ — временное сопротивление разрыву. Из (2) следует, что для вольфрама ($\gamma = 1{,}89 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3, $\sigma_{вр} = 4100$ Н/мм^2) приемлемые значения радиуса острия (200÷500 Å) возможны при диаметре эмиттера менее 0,05 мм. Если же задаться необходимым, с точки зрения механической жесткости, диаметром эмиттера (~1 мм), то острия получаются длинными и тонкими, что тоже крайне нежелательно. В качестве примера оценим амплитуды флуктуаций острия для двух эмиттеров диаметрами 1 и 0,1 мм (что касается длины эмиттера L, то, исходя из конструктивных соображений, она не может быть менее 1 см). Известно, что средний квадрат амплитуды квантовых и тепловых флуктуаций на резонансной частоте ω определяется соответственно как

$$X_q^2 = \hbar\omega / K_M \text{ и } X_T^2 = kT / K_M,$$

где k — постоянная Больцмана, $\omega = K_M / m$, m — эквивалентная масса колебательной системы.

Воспользовавшись этими формулами, а также выражениями для поперечной K_{ML} и продольной K_{MV} жесткости эмиттеров и подставив в них типичные величины параметров, получим значения, приведенные в таблице.

Эмиттер	L, м	D, м	K_M, Н/м	ω, Гц	X_q, м	X_T, м
			Поперечные колебания			
Игла 1	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{4}$	$1 \cdot 10^{4}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Игла 2	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{1}$	$3 \cdot 10^{3}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-6}$
			Продольные колебания			
Игла 1	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1{,}5 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{5}$	$1{,}4 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-9}$
Игла 2	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1{,}5 \cdot 10^{6}$	$3 \cdot 10^{5}$	$1{,}4 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-8}$

Из оценок следует, что второй эмиттер обладает явно недостаточной механической жесткостью. Поэтому для получения эмиттеров с малым радиусом острия в сочетании с их высокой механической жесткостью была разработана методика, в основе которой лежит метод ступенчатой вытяжки эмиттера при электрохимическом травлении. Это позволяет в случае начального диаметра эмиттера примерно 0,8 мм проводить конечный этап травления при рабочем диаметре около 0,05 мм, что в итоге дает достаточно малый радиус острия при наличии высокой механической жесткости эмиттера. Травление проводилось в двухмолярном растворе NaOH на постоянном токе ($U = 5{,}5$ В, $I = 150$ мА). Полученные острия имели радиус ~200 Å (рис. 1) при приемлемых величинах квантовых $X_q \sim 5 \cdot 10^{-13}$ м и тепловых $X_T \sim 3 \cdot 10^{-7}$ м флуктуаций.

Эмиттеры, изготовленные по описанной методике, были использованы в СТМ. Для формирования на вершине эмиттера кластера атомов и очистки эмиттера до начала работы СТМ эмиттер приближался к поверхности образца и на него подавался импульс напряжения. Таким же способом удавалось восстанавливать поверхность зондирующего эмиттера после его соприкосновения с исследуемой поверхностью. Отметим, что метод формирования микроострия электрическим полем использовался в работе [8], но при других условиях, не позволявших получить удовлетворительной воспроизводимости результатов.

На рис. 2 приведен кадр СТМ поверхности Ag, полученной до процесса очистки эмиттера. Четко видны неоднородности, которые не повторяются в соседних строках, т. е. фактически форма реальной поверхности не воспроизводится. На рис. 3 показана топограмма поверхности Ag, но уже после очистки эмиттера. Рабочие режимы СТМ в этих экспериментах поддерживались постоянными: туннельный ток составлял 1 нА при разности потенциалов между зондирующим эмиттером и исследуемой поверхностью 10 мВ; кадры воспроизведены в одинаковых масштабах.

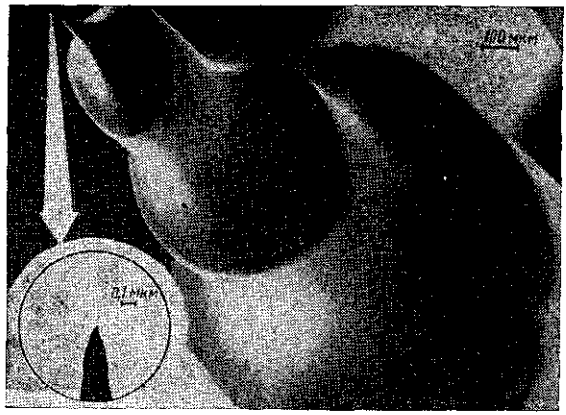

Рис. 1

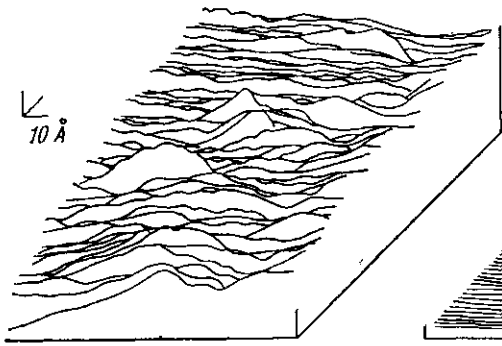

Рис. 2

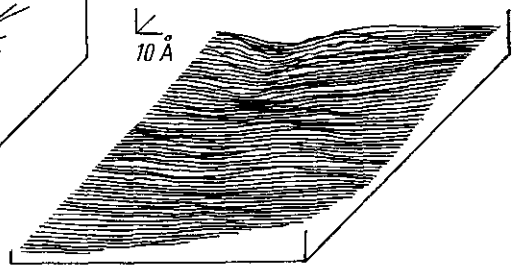

Рис. 3

Таким образом, проведенный анализ позволил выявить оптимальные параметры зондирующего эмиттера, при которых достигается максимальное пространственное разрешение СТМ, а также разработать методику изготовления эмиттеров с заданными свойствами.

В заключение авторы выражают благодарность В. И. Панову за постоянное внимание к работе и В. Б. Леонову за помощь в обработке результатов экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Binning G., Rohrer H.//Helv. Phys. Acta. 1982. **55**. P. 726—735. [2] Binning G., Rohrer H.//Surf. Sci. 1983. **126**. P. 236—244. [3] Латам Р. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. М., 1985. Гл. 5, с. 90. [4] Stoll E., Baratoff A.//J. Phys. C: Solid St. Phys. 1984. **17**. P. 3073—3086. [5] Biegelsen D., Ponce F.//Appl. Phys. Lett. 1987. **50**, N 11. P. 696—698. [6] Hans-Werner Fink.//IBM J. Res. Develop. 1986. **31**. P. 460—465. [7] Фрейберг Г. Н.//Приб. и техн. эксперимента. 1967. № 6. С. 176—178. [8] Walle G. F. A., van de//Surf. Sci. 1987. **181**. P. 27—36.

Поступила в редакцию
04.08.87