

ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА ТУННЕЛЬНЫМ КОНТАКТОМ  
СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

И.И. Смольянинов, М.С. Хайкин, В.С. Эдельман

Реализован новый способ регистрации света, испускаемого туннельным контактом сканирующего туннельного микроскопа. Обнаружены резонансные особенности на зависимостях интенсивности света от приложенного напряжения для туннельных контактов Au-Au, Ag-Ag, Au-Pt и Ag-Pt. Эти особенности можно связать с возбуждением локализованных поверхностных плазмонов.

Получаемая обычно с помощью СТМ информация представляет собой карты рельефа поверхности исследуемого образца и спектра электронных возбуждений с разрешением, достигающим атомного. Представляется перспективным комбинирование СТМ с другими методами исследования поверхностей, в частности, с наблюдением спектров обратной фотозмиссии<sup>2</sup>. Путем такого объединения методик можно надеяться на получение сведений о химическом составе поверхности с пространственным разрешением, свойственным СТМ.

В работе<sup>2</sup> впервые сообщено о регистрации света, испускаемого из туннельного контакта между иридиевой иглой и напыленной *in situ* пленкой серебра. Измерения проводились в условиях сверхвысокого вакуума с помощью ФЭУ, размещенного за окном вакуумной установки. Свет принимался под углом  $\sim 45^\circ$  к поверхности образца в телесном угле 0,1 стерадиан. Авторы наблюдали излучение в области напряжений  $V_T \approx 2,5 \div 4,5$  В, приложенных к туннельному контакту. Они предположили, что это излучение вызвано возбуждением локализованных поверхностных плазмонов<sup>3</sup> – коллективных возбуждений электронной системы, аналогичных плазмонам в объеме металла. Однако вопрос о природе наблюдавшегося излучения нуждается в дальнейшем изучении.

В данной работе реализован новый способ регистрации света, испускаемого туннельным контактом микроскопа. В качестве иглы туннельного микроскопа использован конец 200-микронного кварцевого световода (длиной  $\sim 0,3$  м) покрытый по образующей слоем металла. Второй конец световода был приклеен составом *Stycast-1266* к приемному окну ФЭУ-79, работающего в режиме счета фотонов. Геометрия описываемого опыта по сравнению с работой<sup>2</sup> имеет очевидное преимущество: телесный угол, в котором регистрируются фотоны, испускаемые туннельным контактом, приближается к  $\pi$  стерадиан. Опыты выполнялись на воздухе при комнатной температуре. Конструкция СТМ описана в работе<sup>4</sup>.

Описанный прибор мог работать в режиме сканирующего туннельного оптического микроскопа<sup>2</sup>: при фиксированном напряжении  $V_T$  приложенном между иглой и образцом, можно было одновременно регистрировать карту рельефа и карту интенсивности излучения света контактом игла-образец. Разрешение прибора достигало  $\sim 10$  Å. Интенсивность света от разных участков поверхности одного образца менялась на два порядка величины, однако зависимость интенсивности от величины  $V_T$  для таких участков качественно не изменялась.

На рис. 1 показаны результаты измерений зависимостей интенсивности света от напряжения  $V_T$  для образцов из золота и платины и игл-световодов, покрытых золотом или серебром. В каждом случае произведено усреднение  $\sim 50$  измерений, выполненных с различными иглами в разных местах разных образцов. Образцы представляли собой металлические пленки, напыленные термически или из плазмы катодного разряда на поверхность стекла или металлической фольги. В ходе каждого измерения цепь обратной связи СТМ поддерживала постоянный туннельный ток, устанавливавшийся в интервале  $30 \div 100$  нА.

Положение максимумов интенсивности на рис. 1 подтверждает предположение о том, что излучение света туннельным контактом связано с возбуждением в пространстве между иглой и образцом локализованных поверхностных плазмонов. Уже на качественном уровне сравне-

ние зависимостей при туннелировании в Au показывает, что мы имеем дело с коллективным явлением: замена материала контакта Au на Ag привела не к появлению дополнительной линии при сохранении прежней, а к смещению ее положения. В работе <sup>3</sup> показано, что в туннельном контакте произвольной геометрии может возбуждаться набор плазменных мод с частотами, не превышающими частоту поверхностного плазмона с бесконечным волновым вектором на плоской границе двух металлов <sup>5</sup>:

$$\omega_{sp} = \left( \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — объемные плазменные частоты металлов. Полагая, что энергия излучаемых квантов задается энергией  $eV_T$  туннелирующих электронов, можно ожидать, что при плазменном механизме возбуждения положение максимумов на рис. 1 должно линейно зависеть от

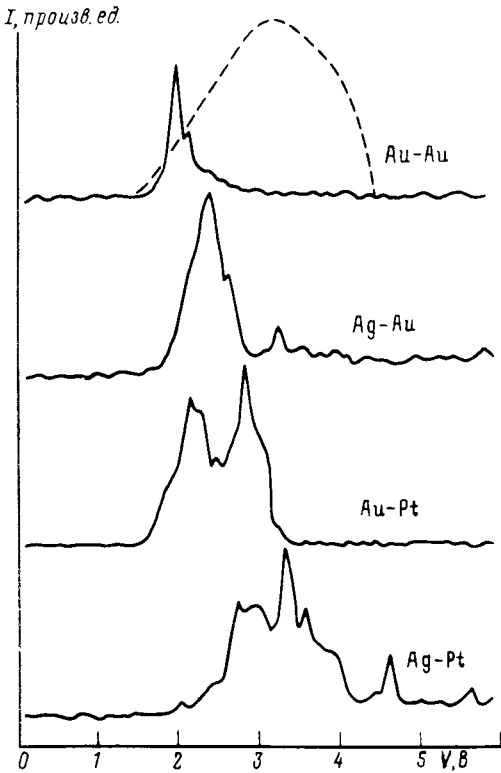


Рис. 1. Зависимость интенсивности света от напряжения между иглой и образцом для туннельных контактов Au-Au, Ag-Au, Au-Pt и Ag-Pt. Первый символ в паре соответствует материалу иглы, второй — материалу образца. Пунктиром показана спектральная чувствительность ФЭУ-79

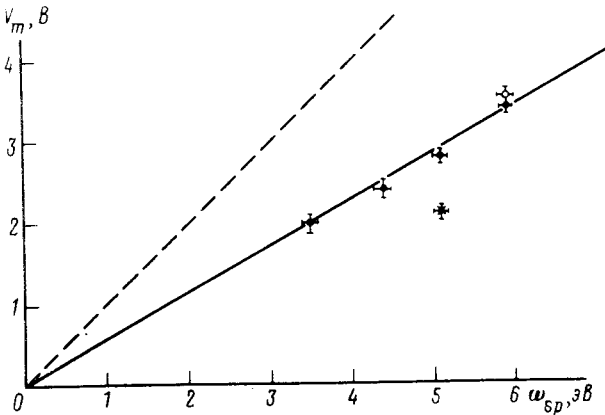


Рис. 2. Зависимость положения максимума интенсивности излучения света от комбинации  $\omega_{sp}$  частот поверхностных плазмонов металлов контактной пары. Крестиком показано положение левого максимума для контакта Au-Pt, открытым кружком показана точка, соответствующая данным работы <sup>2</sup> для контакта Ir-Ag. Пунктиром проведена прямая с единичным наклоном. Частоты  $\omega_{sp}$ , согласно <sup>6</sup>, равны для Au, Ag, Pt, Ir соответственно 3,5; 5,4; 6,6; 6,6 эВ

комбинации (1) плазменных частот материалов иглы и образца. На рис. 2 построена зависимость напряжения  $V_T$  на туннельном контакте, при котором наблюдался максимум интенсивности излучения света, от значения комбинации  $\omega_{sp}$  плазменных частот материалов иглы и образца. На рис. 2 нанесена и точка, соответствующая данным работы <sup>2</sup>. В качестве точки, характеризующей контакт Au-Pt на рис. 2 нанесено положение правого максимума, находящегося при большем значении напряжения между иглой и образцом. Левый максимум может быть следствием возбуждения в контакте другой геометрической моды; соответствующая ему точка показана крестиком. Наклон зависимости на рис. 2 отличается от 1 и равен  $\sim 0,6$ . Согласно работе <sup>3</sup>, по этому наклону можно оценить характерные размеры микроструктур, на которых возбуждаются поверхностные плазмоны. Для сферы диаметра  $a$ , находящейся на расстоянии  $d$  от плоской поверхности металла, в <sup>3</sup> получена оценка частоты локализованного плазмона:  $\omega \sim \omega_{sp}(d/4a)^{1/4}$ . Отсюда при  $d \approx 5 \text{ \AA}$  получаем  $a \sim 10 \text{ \AA}$ . Таким образом представляется, что наблюдаемые максимумы на зависимостях интенсивности света от напряжения  $V_T$  связаны с возбуждением плазменных колебаний на микронеровностях на поверхностях иглы и образца с размерами  $\sim 10 \text{ \AA}$ .

В заключение отметим, что наблюдавшаяся сильная координатная зависимость интенсивности излучения света согласуется с предлагаемым плазмонным механизмом. Хорошо известно, что возбуждение света поверхностными плазмонами происходит только на микронеровностях поверхности <sup>7</sup>, которые могут быть распределены по поверхности неоднородно.

Авторы благодарны А.С.Боровику-Романову за внимание к работе.

#### Литература

1. Binnig G., Rohrer H. Rev. Mod. Phys., 1987, 59, 615; Эдельман В.С. ПТЭ, 1989, № 5, 25.
2. Coombs J.H., Gimzewski J.K., Reihl B. et al. J. of Microscopy, 1988, 152, 325.
3. Rendell R.W., Scalapino D.J. Phys. Rev. B, 1981, 24, 3276.
4. Эдельман В.С. ПТЭ, 1989, № 4, 149.
5. Stern E.A., Ferell R.A. Phys. Rev., 1960, 120, 130.
6. Таблицы физических величин. Под ред. И.К.Кикоина. М.: Атомиздат, 1976, с. 640.
7. Агранович В.М. УФН, 1975, 115, 199.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Институт проблем технологии микроэлектроники  
и особоличстных материалов  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
5 июля 1990 г.