



*Scanning Probe
Microscopy and
Nanoelectronics Laboratory*

tel. : +7 (095) 939-25-02
fax : +7 (095) 939-11-04

***Особенности спектральной плотности
туннельного тока в полупроводниковых
nanoструктурах при наличии примесных
состояний***

В.Н. Манцевич, Н.С. Маслова, А.И. Орешкин

Цель работы

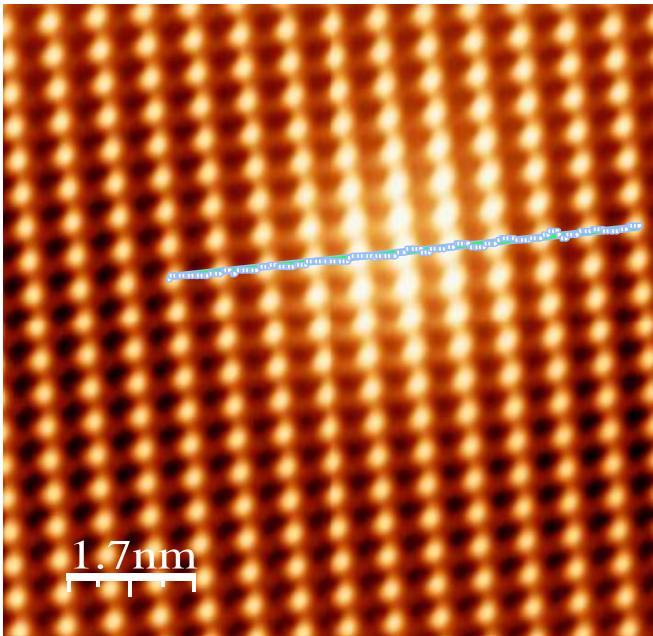
Экспериментальное и теоретическое исследование влияния межчастичного взаимодействия неравновесных электронов на статистические свойства и кинетику туннельных процессов в присутствии зарядовых локализованных состояний в области туннельного контакта сверхмалых размеров.

Задачи

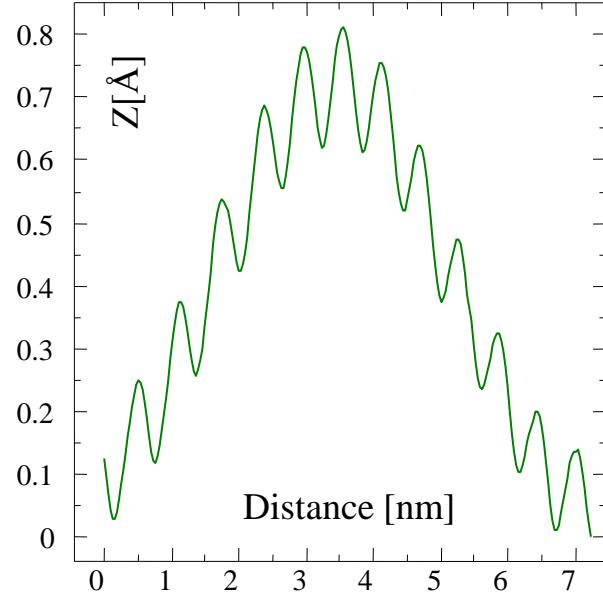
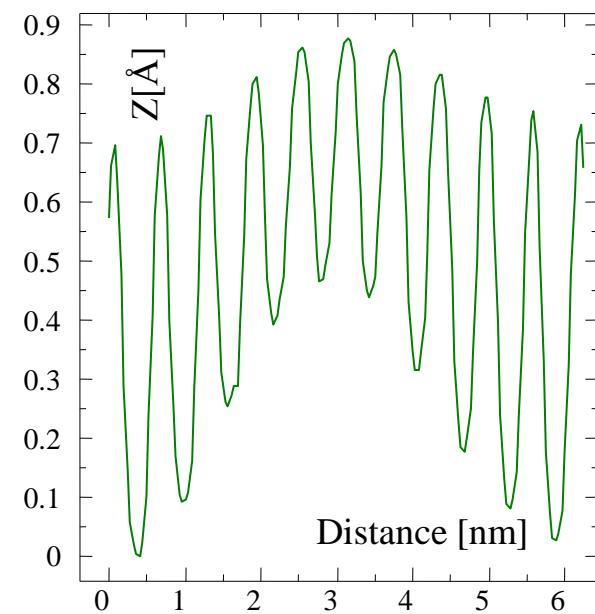
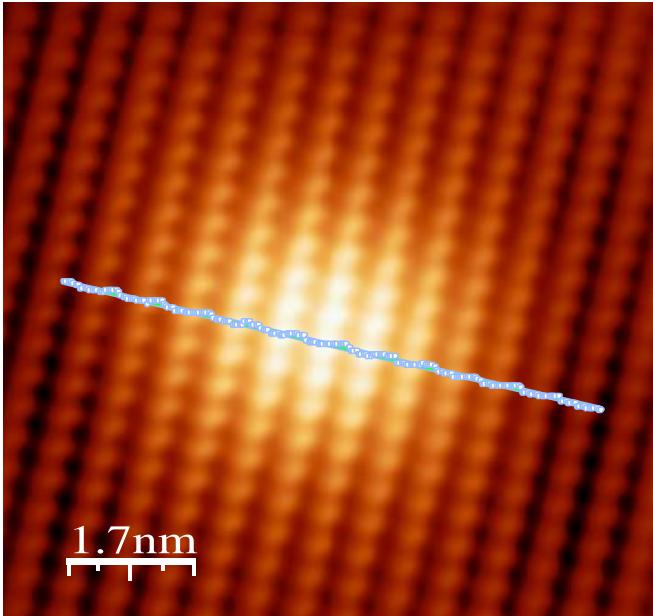
- Изучение роли изолированных примесных атомов в формировании низкочастотной составляющей спектральной плотности туннельного тока вида $1/f^\alpha$ на сколотой поверхности монокристаллов InAs с n- и p- типами объемной проводимости в условиях сверхвысокого вакуума методом сканирующей туннельной микроскопии.
- Исследование теоретической модели, позволяющей на микроскопическом уровне объяснить формирование сингулярных особенностей в спектральной плотности туннельного тока в широком диапазоне напряжений смещения на туннельном контакте.

Топографические изображения примесных атомов

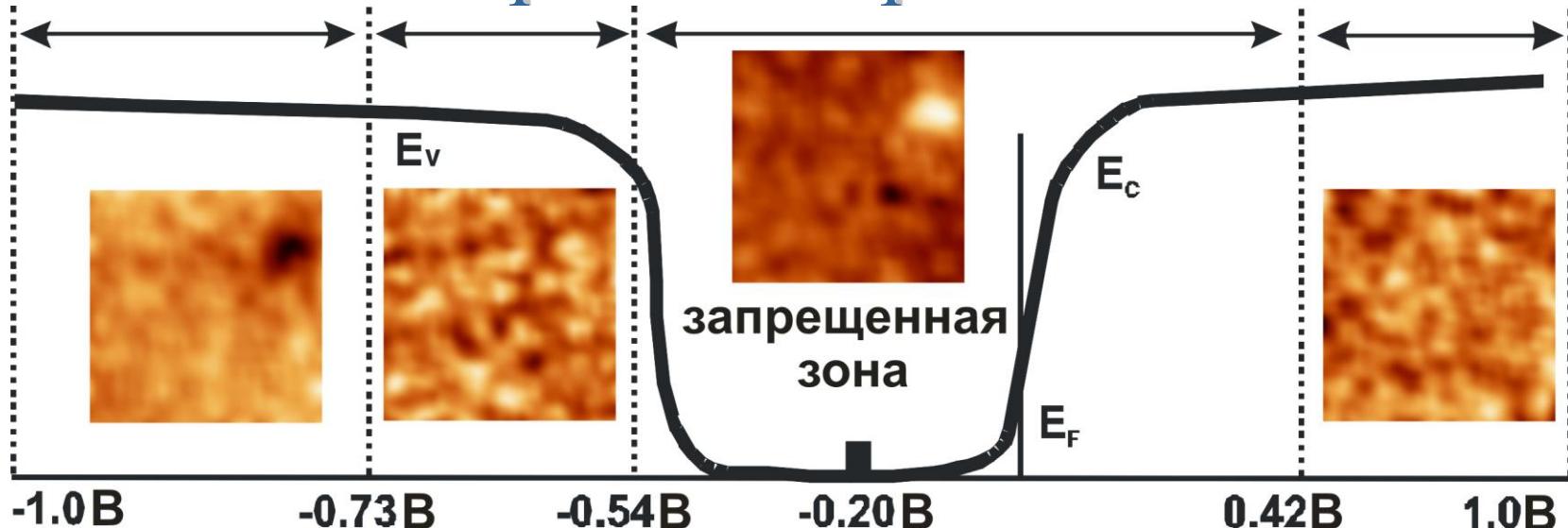
**InAs с примесью
S ($1,5 \times 10^{18}$ см $^{-3}$, n-тип)**
U=-1,1В; I=30пA



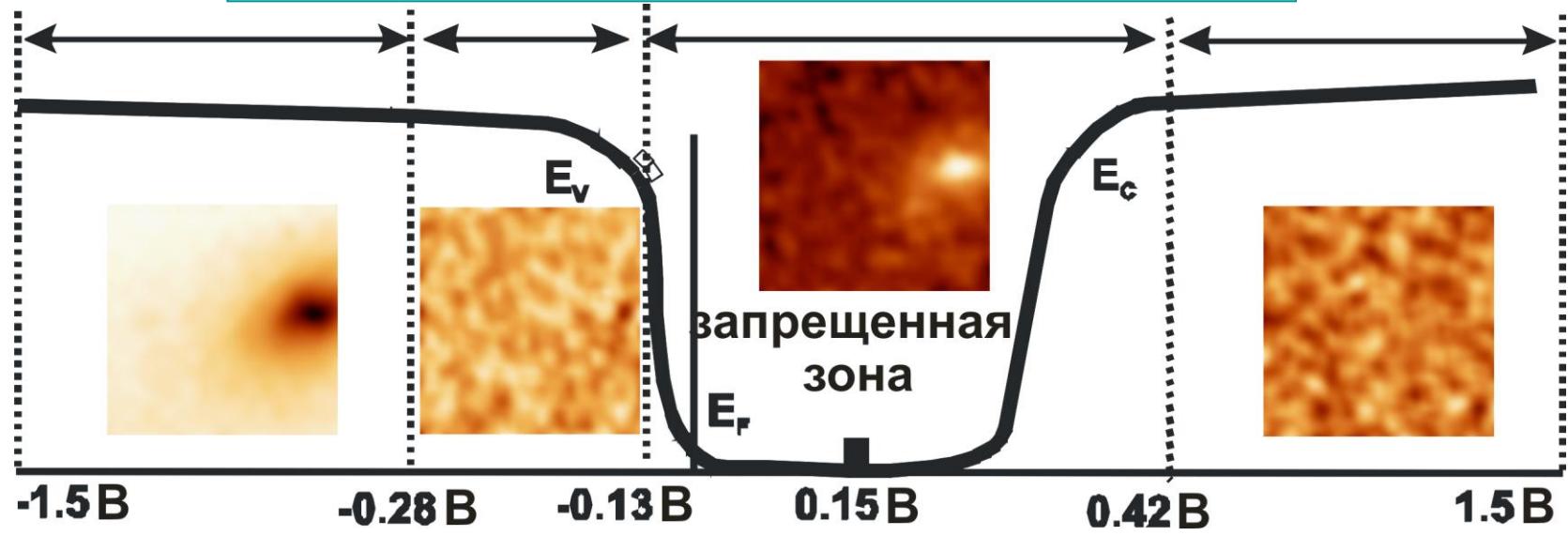
**InAs с примесью
Mn ($1,4 \times 10^{16}$ см $^{-3}$, p-тип)**
U=+0,8В; I=30пA



Токовые изображения примесных атомов



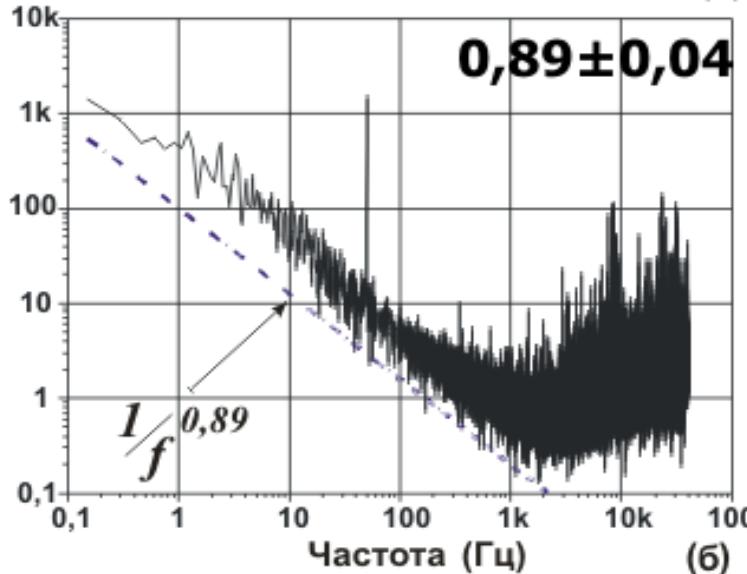
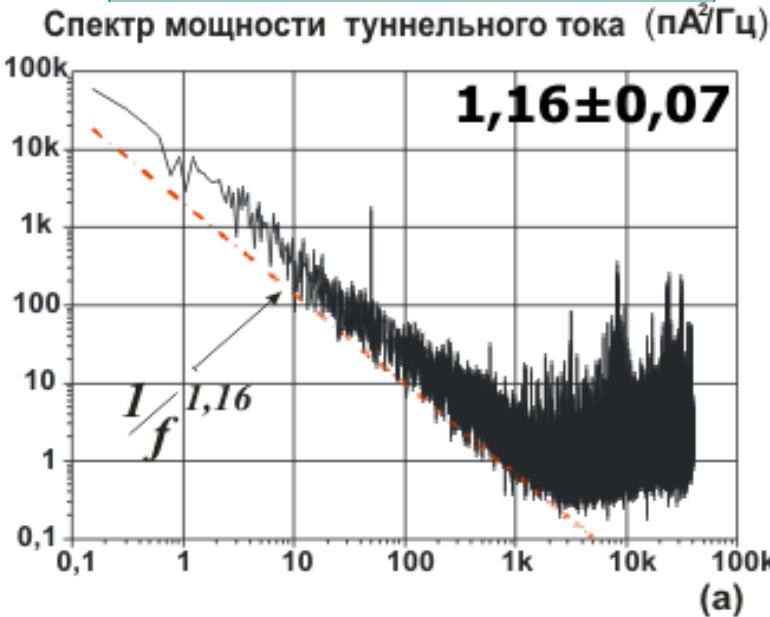
Примесный атом серы на поверхности InAs(110)



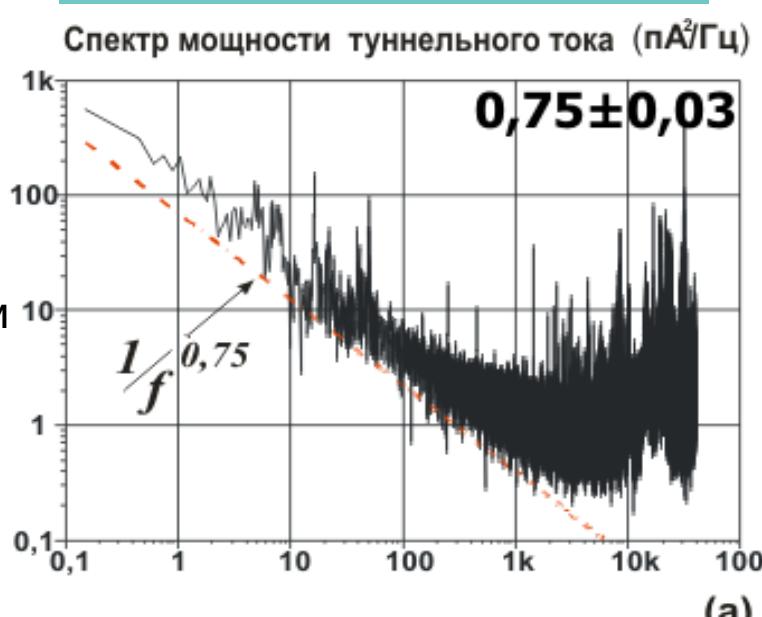
Примесный атом марганца на поверхности InAs(110)

Низкочастотные спектры туннельного тока

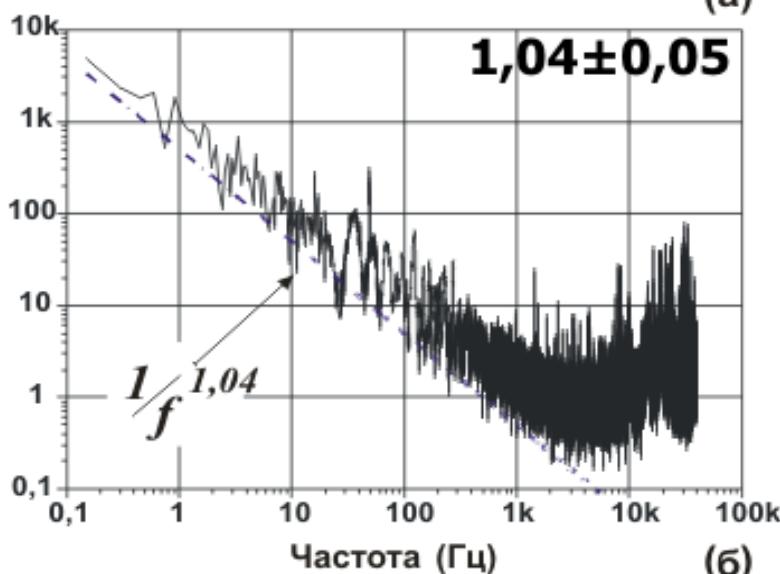
InAs(110) с примесью S:
 $V_s = -0.2$ V; $I = 30$ pA



InAs(110) с примесью Mn:
 $V_s = 0.15$ V; $I = 30$ pA



Над примесным
атомом



Над чистой
поверхностью



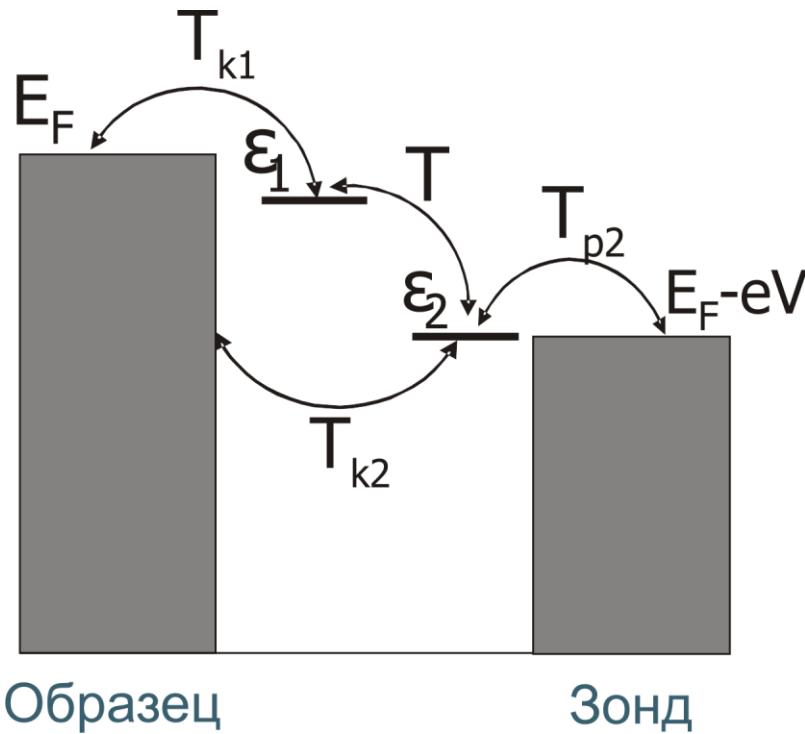
Модельные предположения

- Низкочастотный шум со спектром $1/f^\alpha$, генерируемый в туннельном контакте, связан с изменением заряда примесного состояния при туннелировании электронов через локализованное состояние. В результате при уходе (приходе) электрона из локализованного состояния происходит изменение заряда локализованного состояния и включение кулоновского взаимодействия с состояниями непрерывного спектра в берегах туннельного контакта.
- Спектральная плотность шума туннельного тока определяется выражением:

$$S(\omega) \propto \left(\frac{\xi}{\omega}\right)^{Wv_0}$$

где ξ —ширина разрешенной зоны состояний непрерывного спектра, v_0 —равновесная плотность состояний в берегах туннельного контакта, W —энергия кулоновского взаимодействия локализованного заряда с электронами в берегах туннельного контакта.

Модель туннелирования электронов



ϵ_1 -энергия примесного атома на поверхности

ϵ_2 -энергия локализованного на острие состояния

W_1 -энергия кулоновского взаимодействия локализованного на примесном атоме заряда с электронами в берегах контакта

W_2 -энергия кулоновского взаимодействия локализованного на острие зонда заряда с электронами в берегах контакта

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_T + \hat{H}_{int}$$

$$\hat{H}_0 = \sum_k (\epsilon_k - eV) c_k^+ c_k + \sum_p \epsilon_p c_p^+ c_p + \sum_{i=1,2} \epsilon_i a_i^+ a_i$$

$$\hat{H}_T = \sum_{k,i} T_{ki} c_k^+ a_i + \sum_{p,i} T_{pi} c_p^+ a_i + T \sum_{i \neq j} a_i^+ a_j + h.c.$$

$$\hat{H}_{int} = \sum_{k,k'} W_1 c_k^+ c_{k'} a_1 a_1^+ + \sum_{k,k'} W_2 c_k^+ c_{k'} a_2 a_2^+$$

Корреляционная функция туннельного тока

Корреляционная функция туннельного тока может быть записана в виде:

$$(\frac{\hbar}{e})^2 \cdot S(t, t') = \langle I_L(t) I_L(t') \rangle - \langle I_L(t) \rangle^2 = \sum_{k, k', i, j} T_k^2 \langle c_k^+(t') a_i(t') a_j^+(t) c_{k'}(t) \rangle$$

Выражение для туннельного тока:

$$I_L(t) = \sum_k \dot{n}_k \cdot e = \left(\sum_k c_k^+(t') a_i(t') T_{ki} - h.c. \right) \cdot \left(\frac{e}{\hbar} \right)$$

С использованием функций Грина для одного локализованного состояния в области туннельного контакта спектральная плотность туннельного тока имеет вид:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\hbar}{e} \right)^2 S_0(\omega) &= T_{k1}^2 \cdot \sum_{k, k_1} (G_{kk_1}^<(\omega) \cdot G_{11}^>(\omega + \omega_1) + G_{11}^<(\omega) \cdot G_{kk_1}^>(\omega + \omega_1)) + \\ &+ T_{k1}^2 \cdot \sum_{k, k_1} (G_{k1}^<(\omega) \cdot G_{k_1 1}^>(\omega + \omega_1) + G_{k_1 1}^<(\omega) \cdot G_{k1}^>(\omega + \omega_1)) + (\omega - > - \omega) \end{aligned}$$

Диаграммы без перенормировки два локализованных состояния

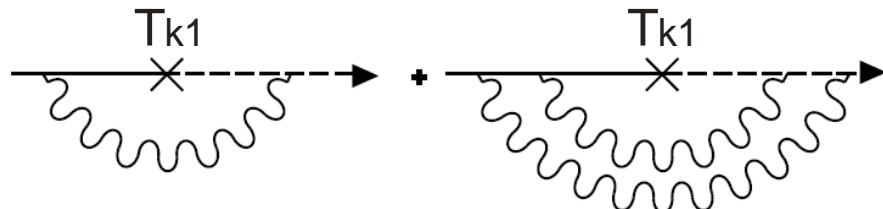
$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\hbar}{e}\right)^2 S_0(\omega) = & \langle \dot{Q}_L \dot{Q}_L \rangle = \gamma_k^2 \cdot \int d\omega' \operatorname{Im} G_{dd}^R(\omega') \cdot \operatorname{Im} G_{dd}^R(\omega + \omega') \cdot \\
 & \cdot \{(n_d(\omega + \omega') - 1) \cdot (n_d(\omega') - n_k(\omega')) + n_d(\omega') \cdot (n_d(\omega + \omega') - n_k(\omega + \omega'))\} + \\
 & + \gamma_k^2 \cdot \int d\omega' \operatorname{Im} G_{dd}^R(\omega') \cdot \operatorname{Im} G_{dd}^R(\omega + \omega') \cdot \\
 & \cdot \{(n_k(\omega + \omega') - 1) \cdot n_d(\omega') - n_d(\omega') \cdot (n_d(\omega + \omega') - 1) - \\
 & - (n_k(\omega + \omega') - 1) \cdot n_k(\omega') + n_k(\omega') \cdot (n_d(\omega + \omega') - 1)\} + \\
 & + \int d\omega' \gamma_k \{n_k(\omega') \cdot (n_d(\omega + \omega') - 1) \cdot \operatorname{Im} G_{dd}^R(\omega + \omega') + (n_k(\omega + \omega') - 1) \cdot n_d(\omega') \cdot \operatorname{Im} G_{dd}^R(\omega')\} + (\omega \leftrightarrow -\omega) \\
 & \omega + \omega' \qquad \qquad \qquad \omega \\
 & \mathbf{i}, \mathbf{j} = 1, 2
 \end{aligned}$$

$$\left(\frac{\hbar}{e}\right)^2 S_0(\omega) = \langle \dot{Q}_L \dot{Q}_L \rangle = \tilde{S}_{01}(\omega) + \tilde{S}_{02}(\omega) + \tilde{S}_{03}(\omega)$$

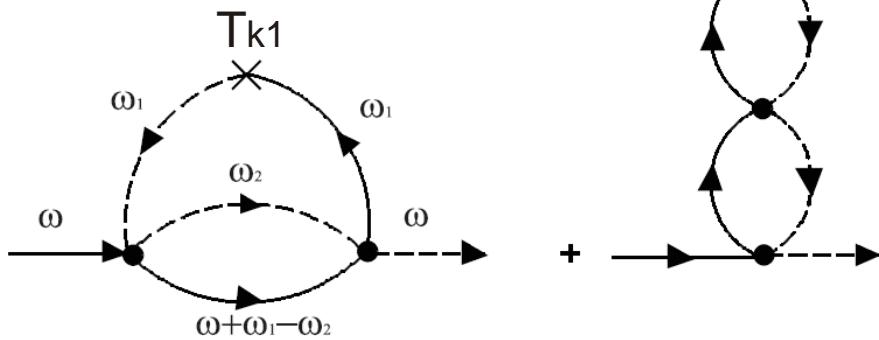
Выражение для спектральной плотности туннельного тока S_{03} обусловлено учетом возможности туннелирования электронов из состояний непрерывного спектра исследуемой поверхности (полупроводника) как в локализованное состояние на острие зонда (амплитуда туннельного перехода T_{k2}), так и в локализованное состояние, образованное примесным атомом (амплитуда туннельного перехода T_{k1}).

Механизм кулоновского взаимодействия

Лестничные диаграммы



Паркетные диаграммы



E_F



T_k

ε

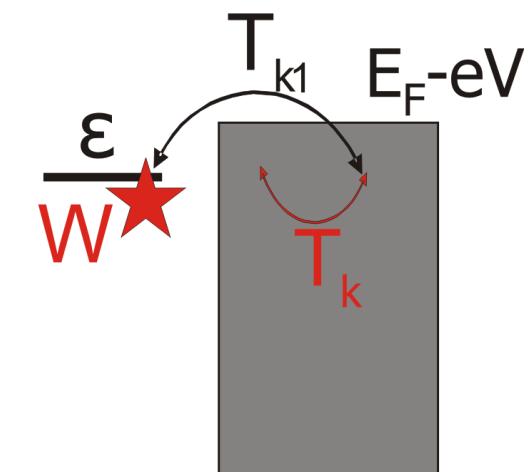
$E_F - eV$

E_F

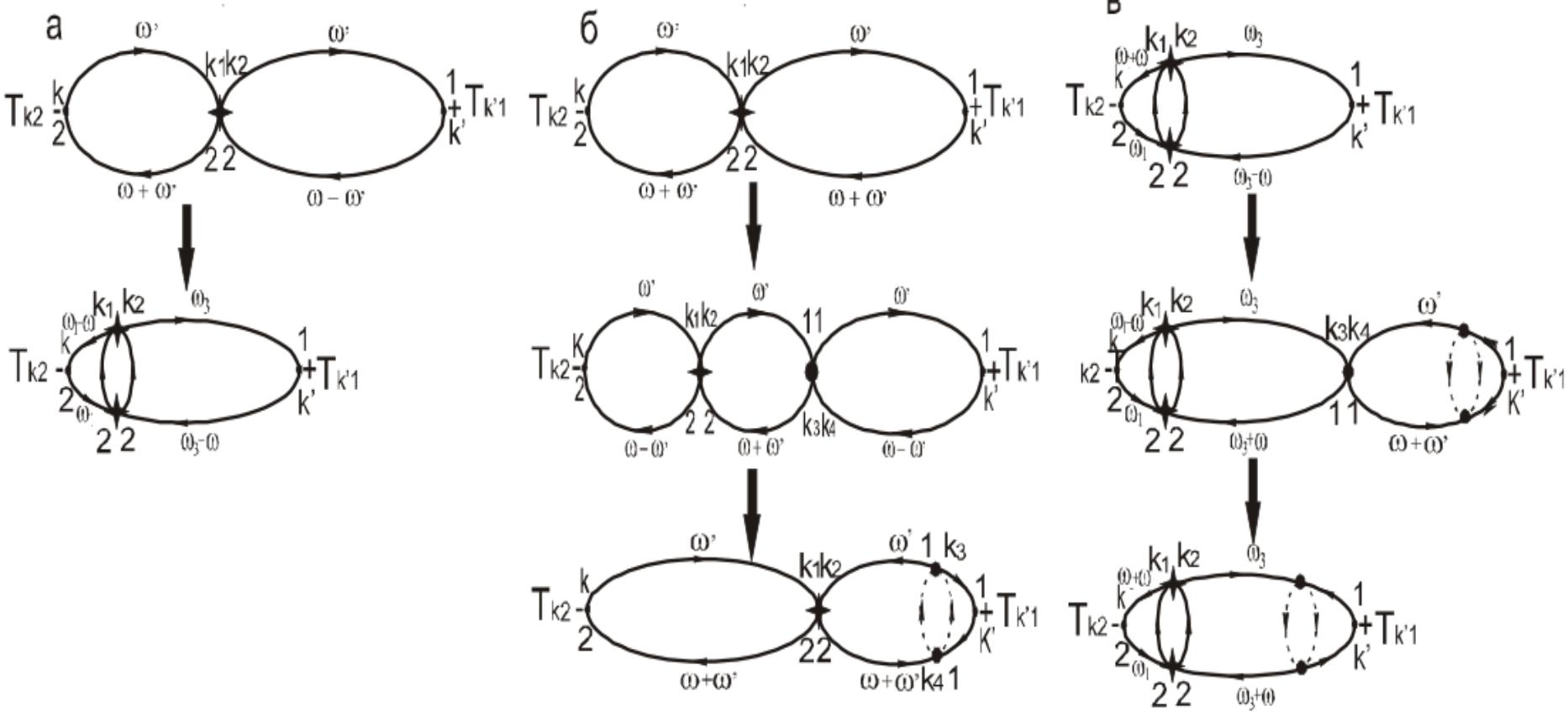
ε
 W \star

T_{k1}
 T_k

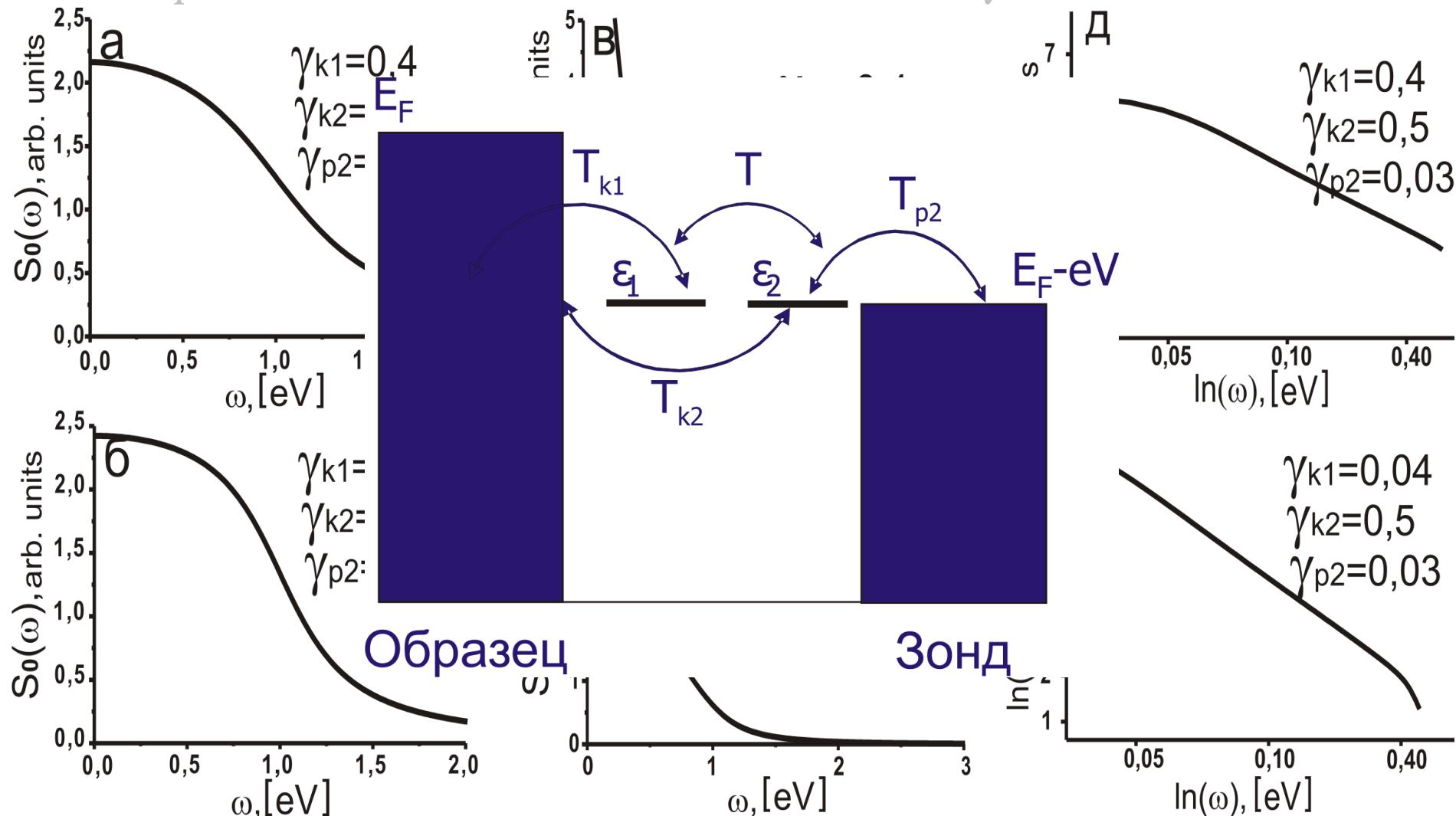
$E_F - eV$



Перенормированные диаграммы два локализованных состояния



Формирование низкочастотных сингулярных особенностей при туннелировании через два локализованных состояния в области туннельного контакта



Зависимости низкочастотной составляющей спектральной плотности туннельного тока от частоты при различных значениях скоростей переходов. $eV=\varepsilon_1=\varepsilon_2=1$.

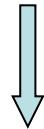
Сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными результатами

При измерении шума над чистой поверхностью: **$Tr2=0, T=0, W2=0, Tk2=0, \varepsilon1=eV$** .

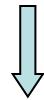
Спектральная плотность шума: $S(\omega) = S_1(\omega) \propto \left(\frac{\xi}{\omega}\right)^{|W_1|v_0} \longrightarrow \alpha = |W_1| \cdot v_0$

Положительно заряженная
примесь:

$$S(\omega) = S_1(\omega) \cdot S_2(\omega) \propto \left(\frac{\xi}{\omega}\right)^{(|W_1| + |W_2|) \cdot v_0}$$



$$\alpha = |W_1| \cdot v_0 + |W_2| \cdot v_0$$



$$\alpha_{\text{поверхность}} < \alpha_{\text{примесь}}$$

Отрицательно заряженная
примесь:

$$S(\omega) = S_1(\omega) \cdot S_2(\omega) \propto \left(\frac{\xi}{\omega}\right)^{(|W_1| - |W_2|) \cdot v_0}$$

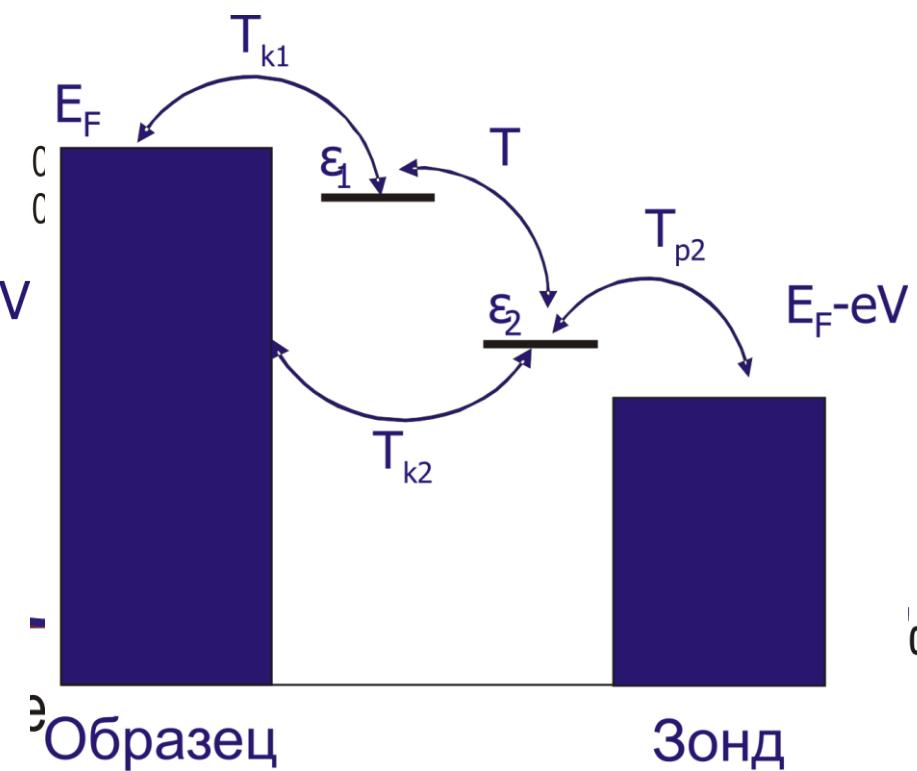
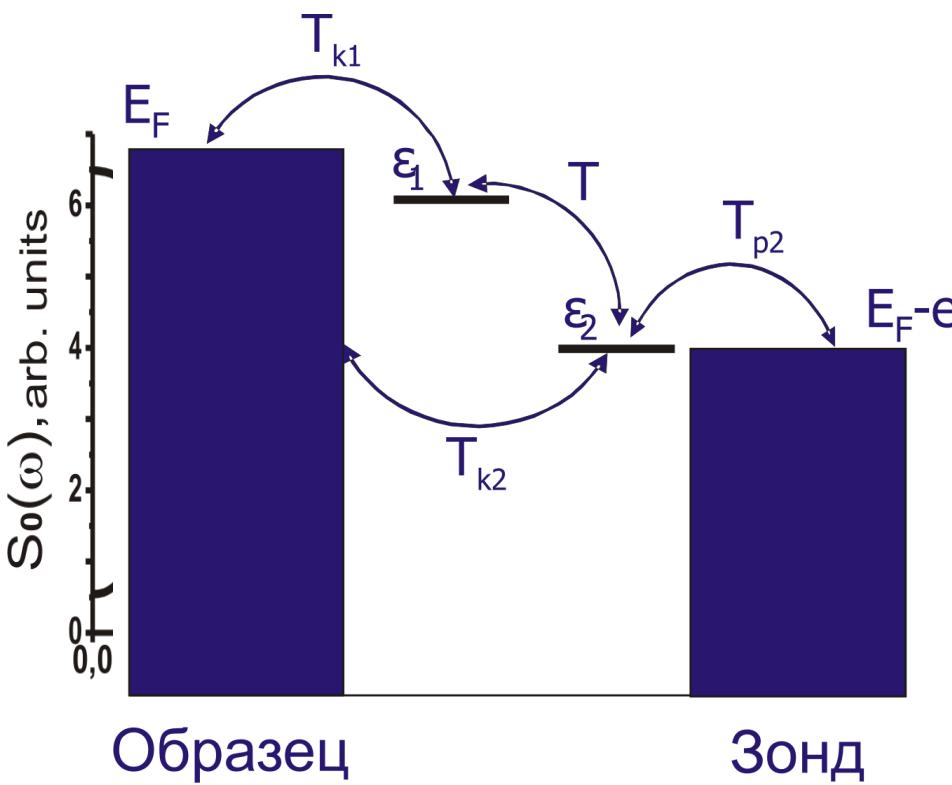


$$\alpha = |W_1| \cdot v_0 - |W_2| \cdot v_0$$



$$\alpha_{\text{примесь}} < \alpha_{\text{поверхность}}$$

Формирование высокочастотных сингулярных особенностей при туннелировании через два локализованных состояния в области туннельного контакта



Зависимости спектральной плотности туннельного тока от частоты: а) без учета кулоновского взаимодействия при значении параметра $T=0,01$; б)-в) с учетом кулоновского взаимодействия при значении параметра $T=0,01$: б) $eV = \varepsilon_2 \neq \varepsilon_1$; в) $eV \neq \varepsilon_2 \neq \varepsilon_1$

Заключение

- Проведено экспериментальное исследование локальных спектров туннельного тока над индивидуальными примесными атомами и выявлена зависимость низкочастотной составляющей спектральной плотности шума туннельного тока от зарядового состояния примесных атома на поверхности (110) монокристаллов InAs с n- и p- типами объемной проводимости.
- Предложена теоретическая модель, учитывающая эффекты многократного рассеяния электронов проводимости на включающемся кулоновском потенциале, вызванным изменением заряда локализованного состояния в области туннельного контакта в процессе туннелирования электронов. Данная модель позволяет на микроскопическом уровне объяснить сингулярное поведение низкочастотной составляющей спектральной плотности шума туннельного тока вида $1/f^\alpha$.
- Обнаружено, что перенормировка туннельных амплитуд переходов при учете кулоновского взаимодействия зарядовых локализованных состояний с электронами непрерывного спектра может приводить к появлению сингулярных особенностей в высокочастотной области спектров туннельного тока и к сдвигу сингулярных особенностей из низкочастотной области в высокочастотную область при изменении величины напряжения смещения на туннельном контакте.