



***Особенности спектральной плотности  
туннельного тока в полупроводниковых  
наноструктурах 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.**

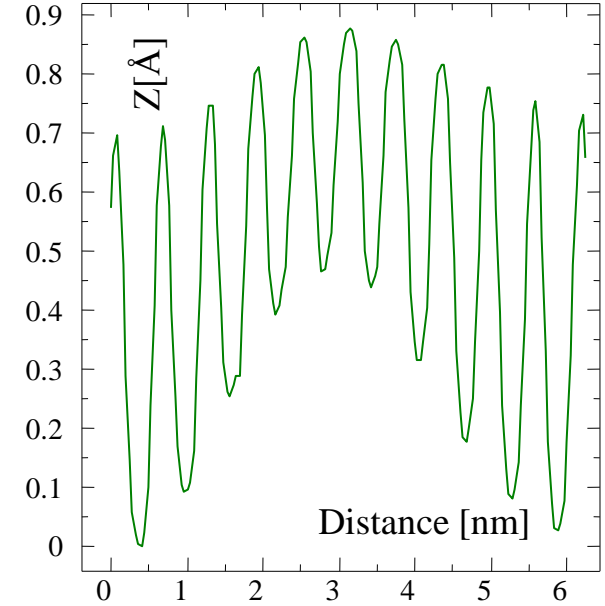
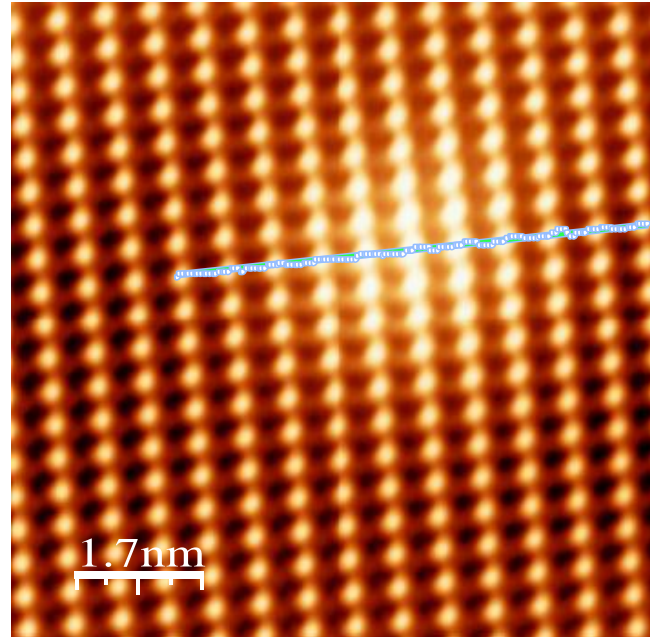
# Задачи

- 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

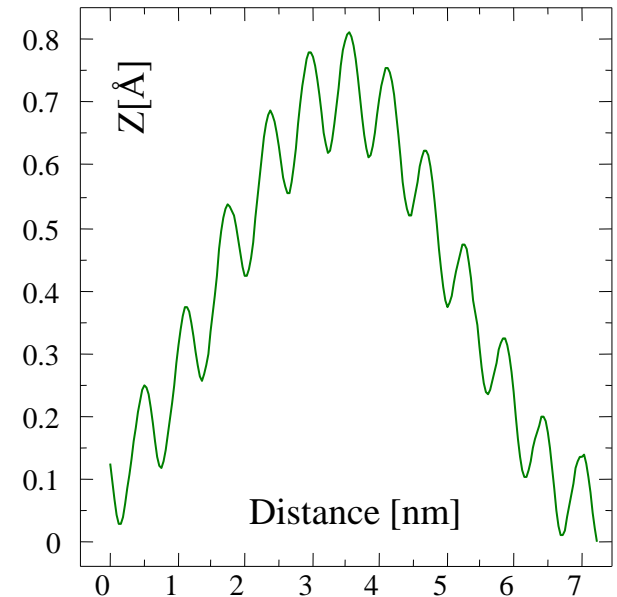
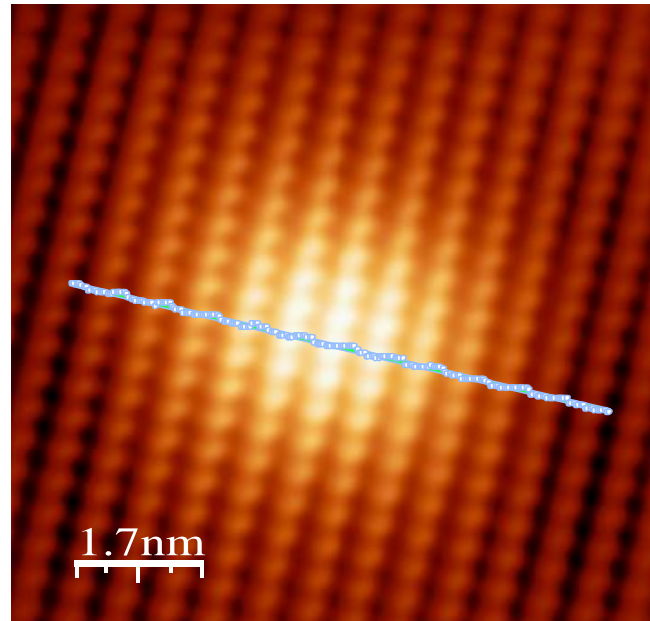
**InAs с примесью  
S ( $1,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , n-тип)**

**U = -1,1 В; I = 30 пА**

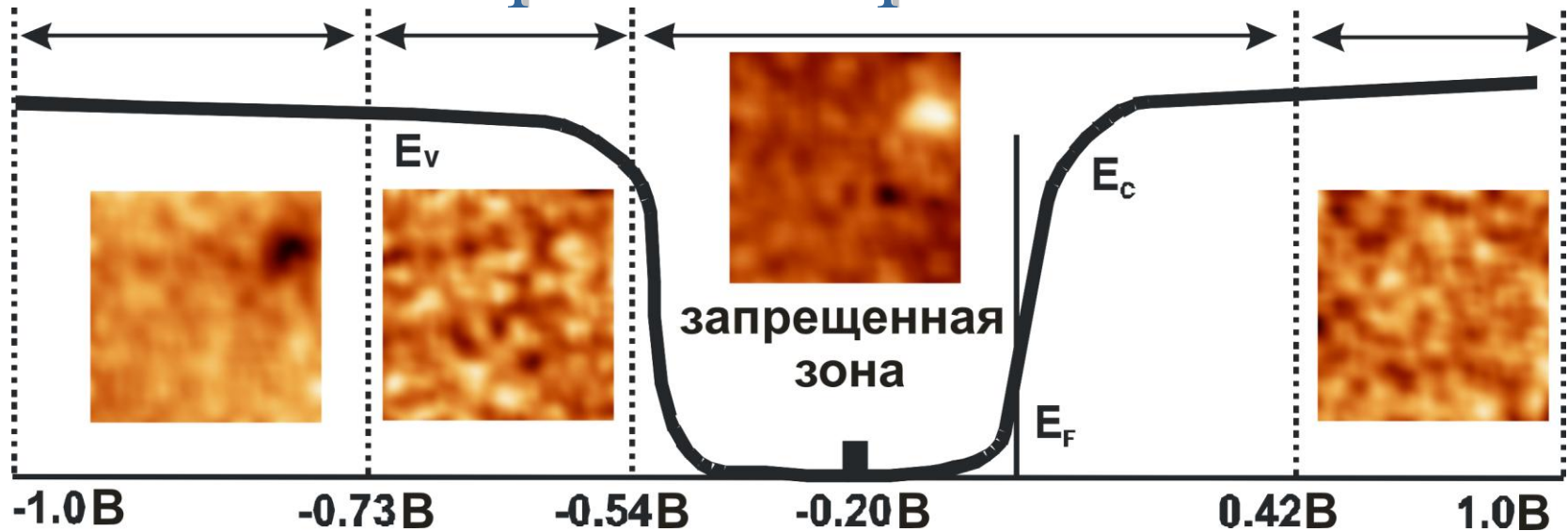


**InAs с примесью  
Mn ( $1,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , p-тип)**

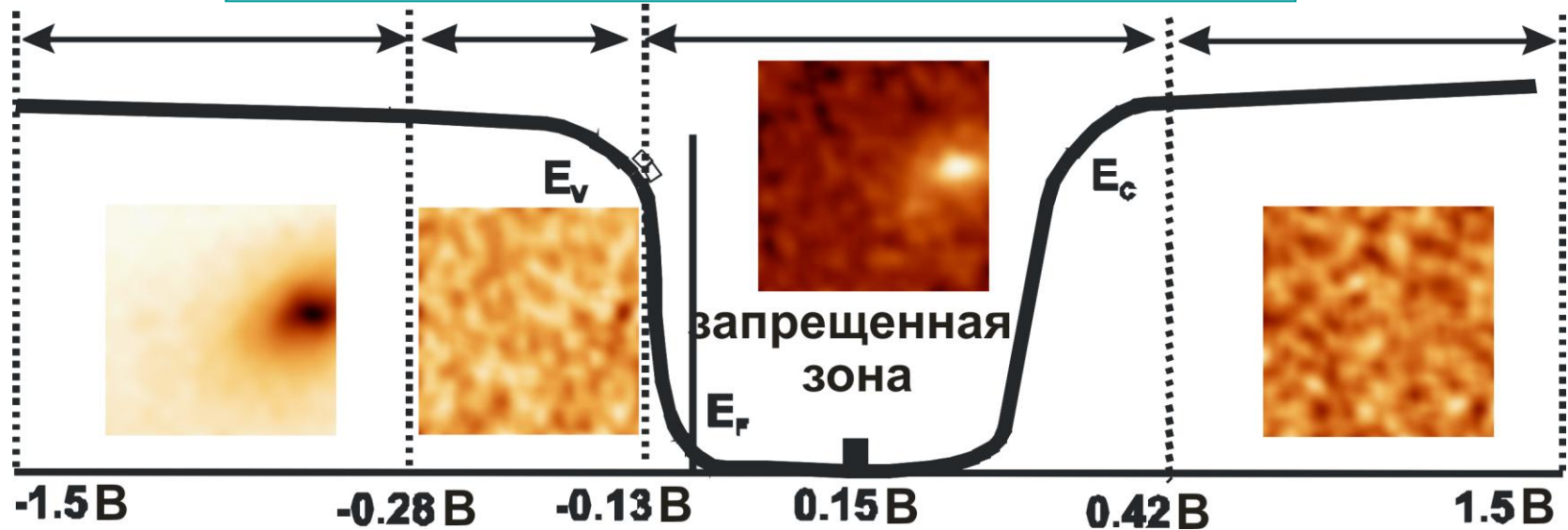
**U = +0,8 В; I = 30 пА**



# Токовые изображения примесных атомов



Примесный атом серы на поверхности InAs(110)

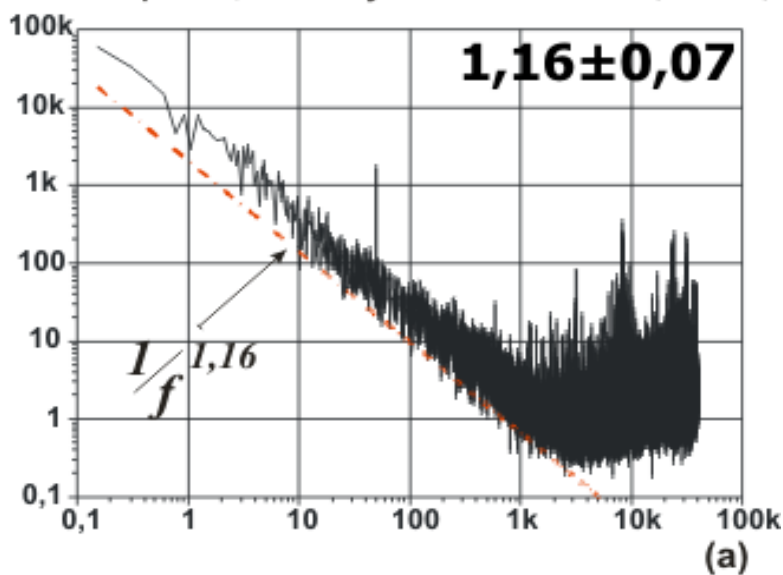


Примесный атом марганца на поверхности InAs(110)

# Низкочастотные спектры туннельного тока

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

Спектр мощности туннельного тока ( $\text{пА}^2/\text{Гц}$ )

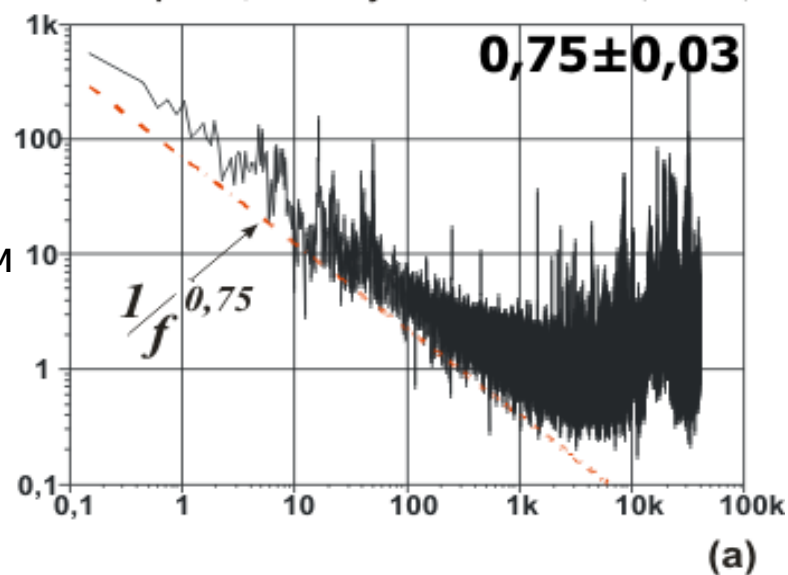


Над примесным атомом

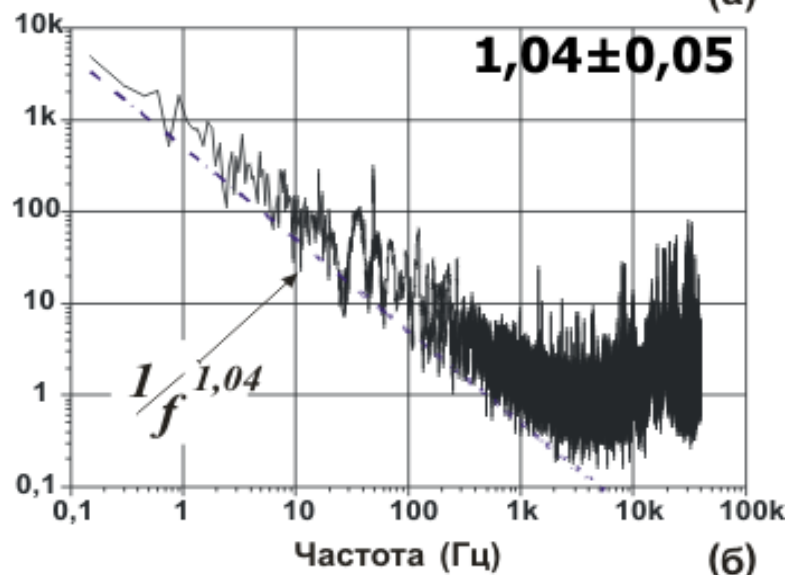
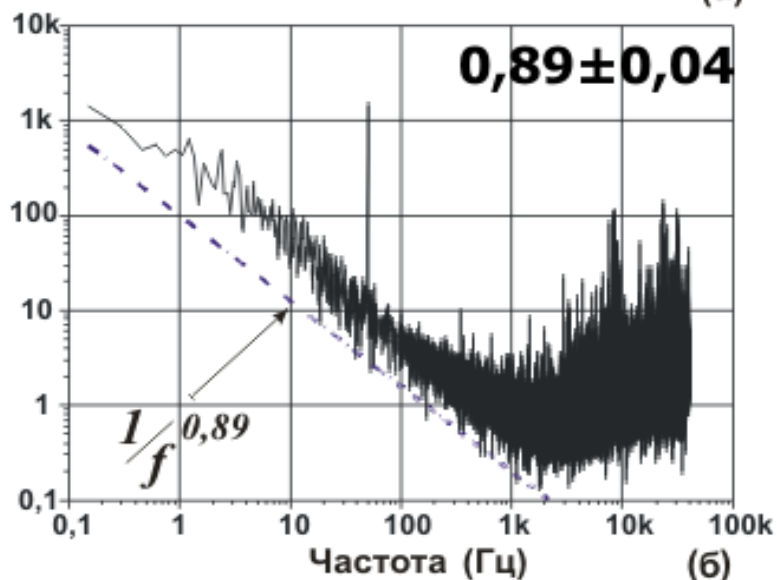


InAs(110) с примесью Mn:  
 $V_s = 0.15$  V;  $I = 30$  pA

Спектр мощности туннельного тока ( $\text{пА}^2/\text{Гц}$ )



Над чистой поверхностью



# Модельные предположения

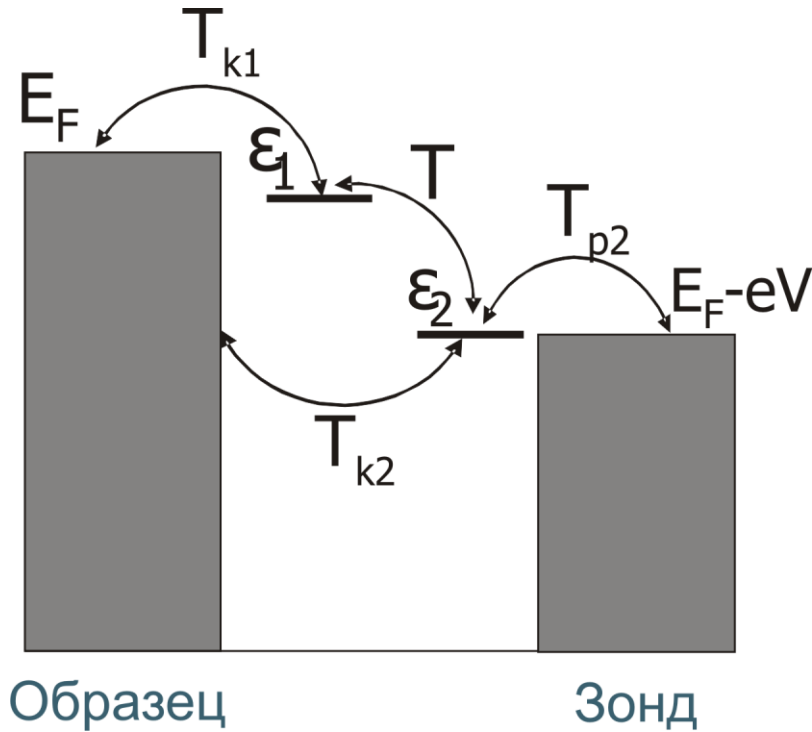
- Низкочастотный шум со спектром  $1/f^\alpha$ , генерируемый в туннельном контакте, связан с изменением заряда примесного состояния при туннелировании электронов через локализованное состояние. В результате при уходе (приходе) электрона из локализованного состояния происходит изменение заряда локализованного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

$$S(\omega) \propto \left(\frac{\xi}{\omega}\right)^{W\nu_0}$$

где  $\xi$ —ширина разрешенной зоны состояний непрерывного спектра,  $\nu_0$ -равновесная плотность состояний в берегах туннельного контакта,  $W$ -энергия кулоновского взаимодействия локализованного заряда с электронами в берегах туннельного контакта.



# Модель туннелирования электронов



$\varepsilon_1$ -энергия примесного атома на поверхности

$\varepsilon_2$ -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

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

$$\hat{H}_0 = \sum_k (\varepsilon_k - eV) c_k^\dagger c_k + \sum_p \varepsilon_p c_p^\dagger c_p + \sum_{i=1,2} \varepsilon_i a_i^\dagger a_i$$

$$\hat{H}_T = \sum_{k,i} T_{ki} c_k^\dagger a_i + \sum_{p,i} T_{pi} c_p^\dagger a_i + T \sum_{i \neq j}^{i=1,2} a_i^\dagger a_j + h.c.$$

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



# Корреляционная функция туннельного тока

Корреляционная функция туннельного тока может быть записана в виде:

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

Выражение для туннельного тока:

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

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

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

# Диаграммы без перенормировки

## два локализованных состояния

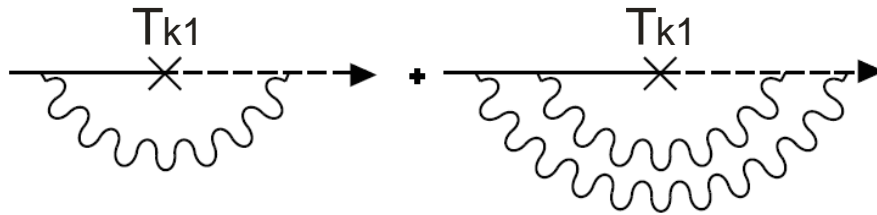
$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\hbar}{e}\right)^2 S_0(\omega) = & \langle \dot{Q}_L \dot{Q}_L \rangle = \gamma_k^2 \cdot \int d\omega' \operatorname{Im} G_{dd}^R(\omega') \cdot \operatorname{Im} G_{dd}^R(\omega + \omega') \cdot \\
 & \cdot \{ (n_d(\omega + \omega') - 1) \cdot (n_d(\omega') - n_k(\omega'))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

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

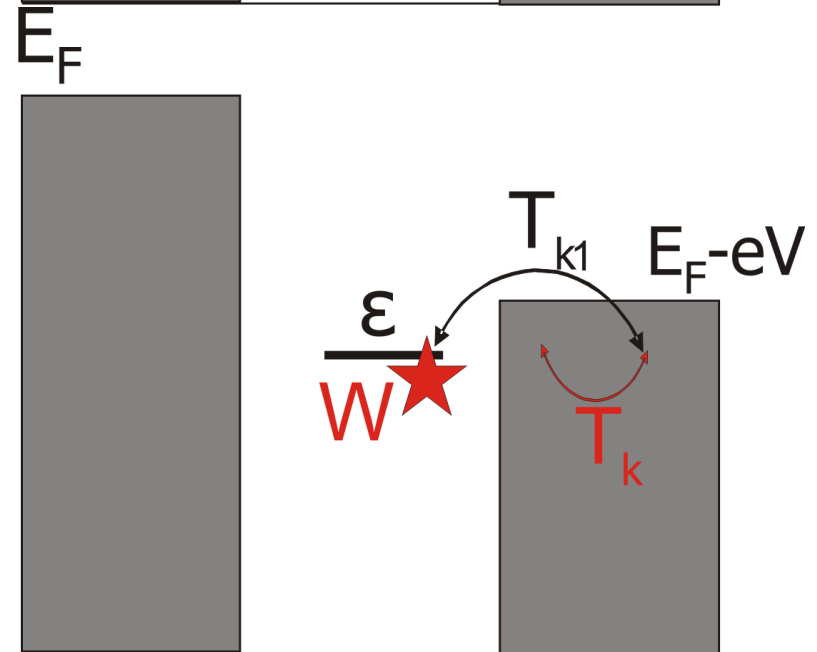
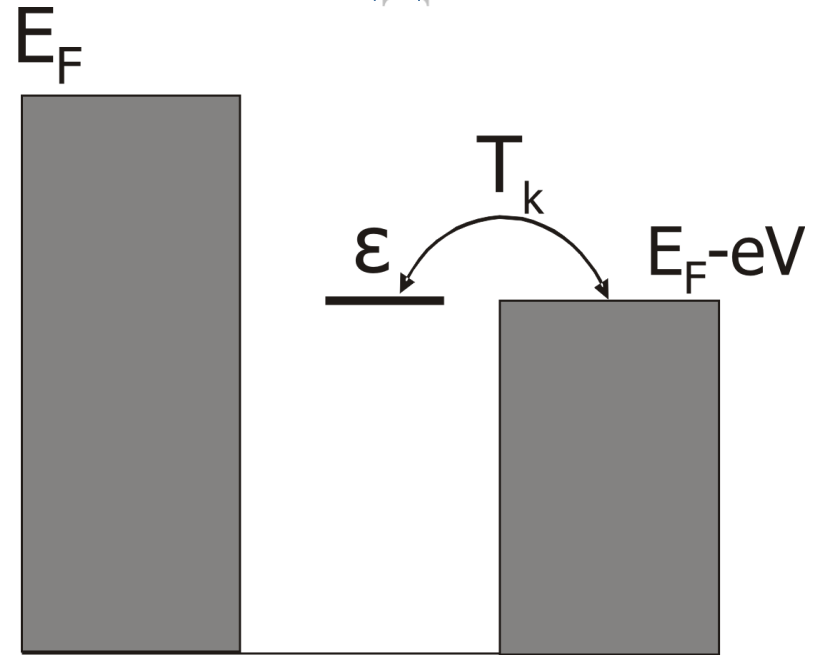
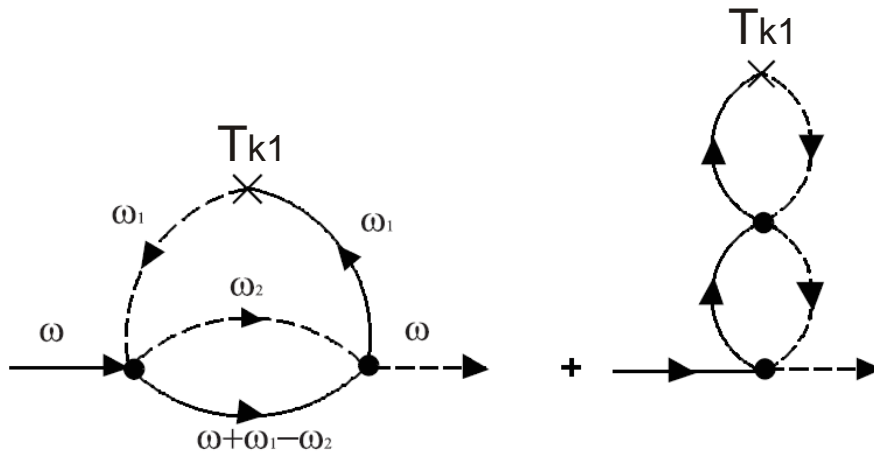
Выражение для спектральной плотности туннельного тока  $S_{03}$  обусловлено учетом возможности туннелирования электронов из состояний непрерывного спектра исследуемой поверхности (полупроводника) как в локализованное состояние на острие зонда (амплитуда туннельного перехода  $T_{k2}$ ), так и в локализованное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

# Механизм кулоновского взаимодействия

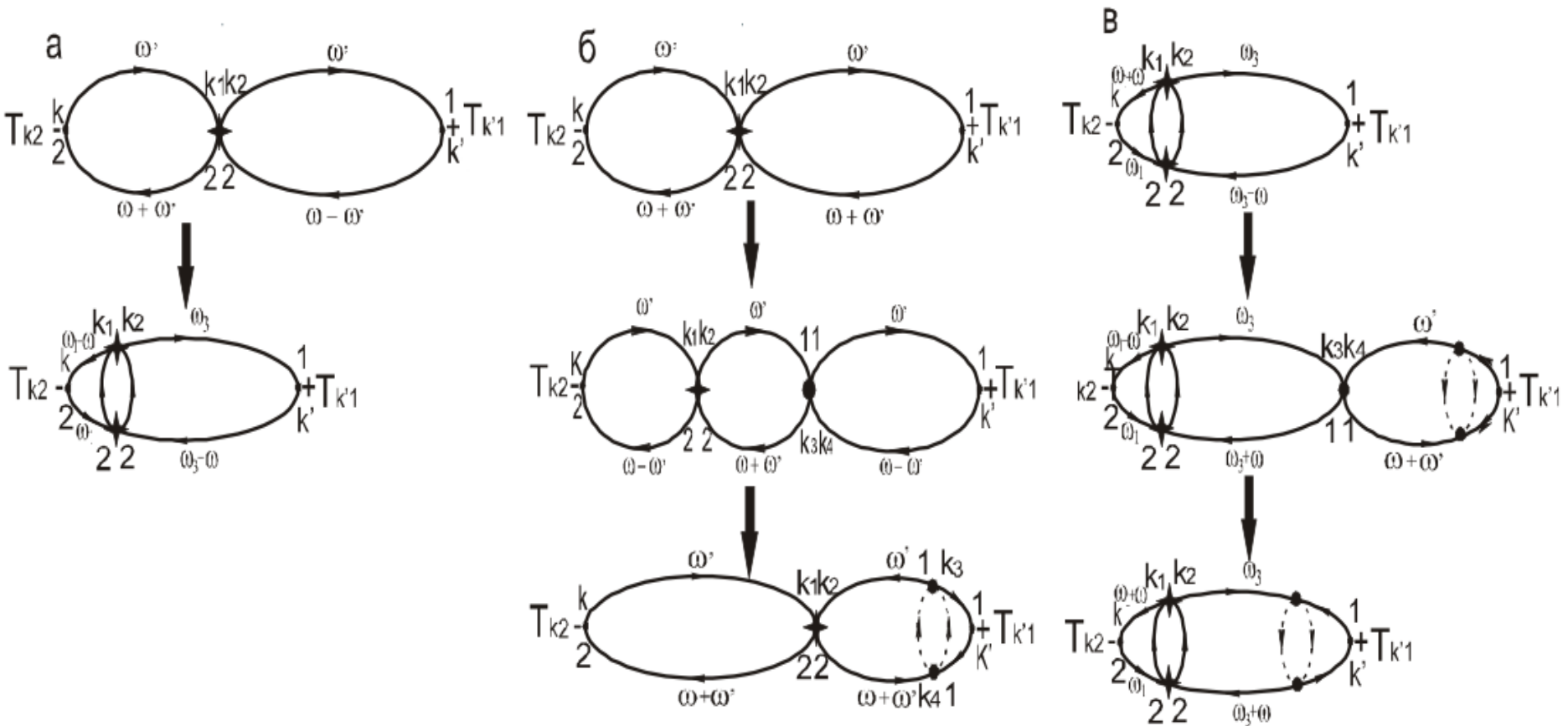
## Лестничные диаграммы



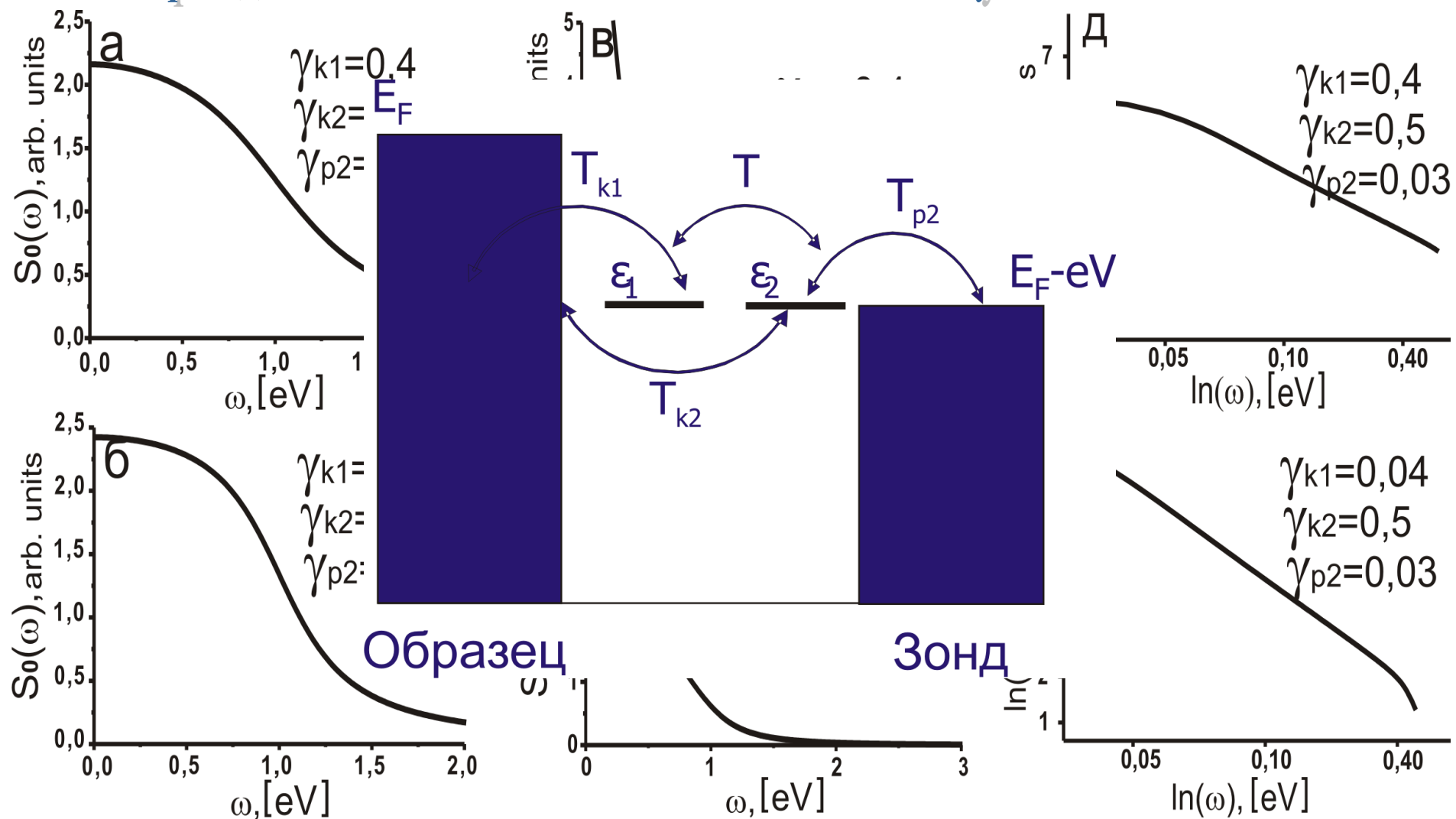
## Паркетные диаграммы



# 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.  $eV=\epsilon_1=\epsilon_2=1$ .

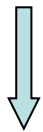
# Сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными результатами

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

Спектральная плотность шума:  $S(\omega) = S_1(\omega) \propto \left(\frac{\xi}{\omega}\right)^{|W_1| \cdot \nu_0} \longrightarrow \alpha = |W_1| \cdot \nu_0$

Положительно заряженная примесь:

$$S(\omega) = S_1(\omega) \cdot S_2(\omega) \propto \left(\frac{\xi}{\omega}\right)^{(|W_1|+|W_2|) \cdot \nu_0}$$



$$\alpha = |W_1| \cdot \nu_0 + |W_2| \cdot \nu_0$$



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

Отрицательно заряженная примесь:

$$S(\omega) = S_1(\omega) \cdot S_2(\omega) \propto \left(\frac{\xi}{\omega}\right)^{(|W_1|-|W_2|) \cdot \nu_0}$$

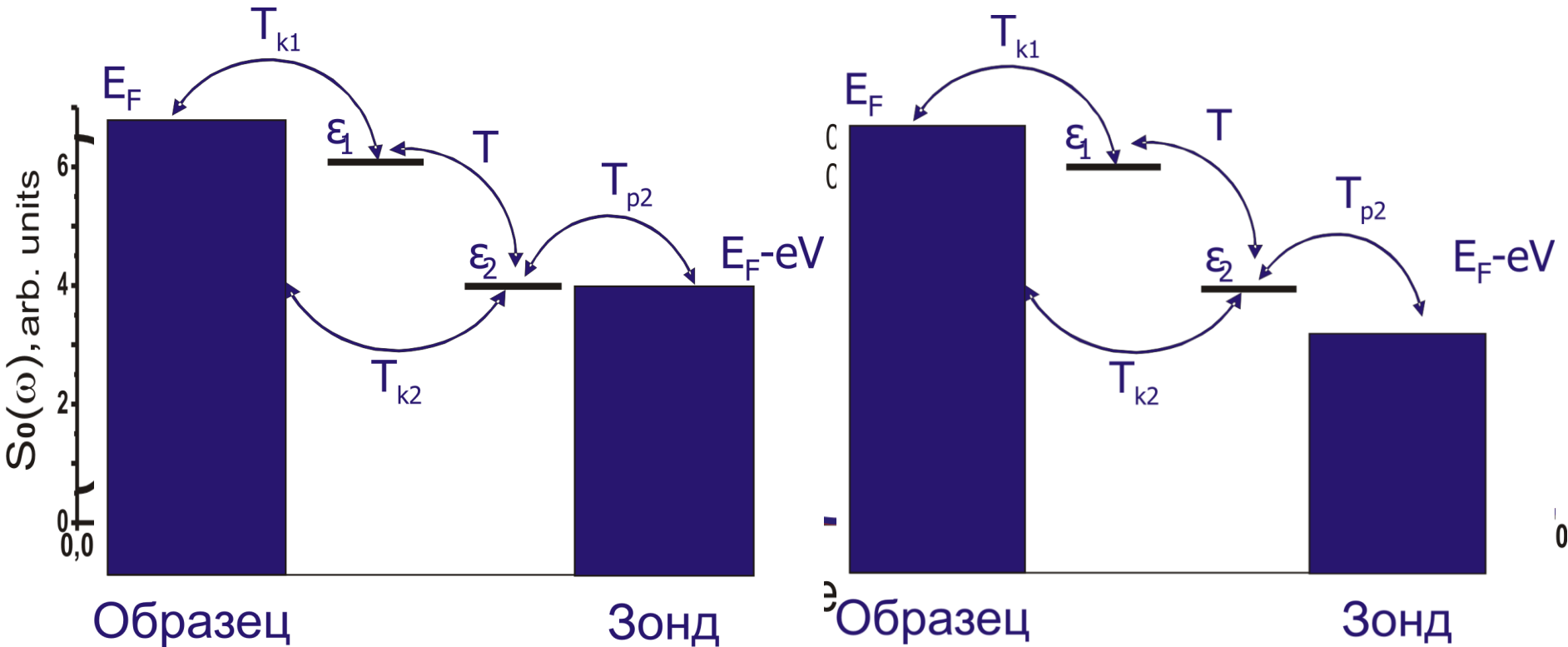


$$\alpha = |W_1| \cdot \nu_0 - |W_2| \cdot \nu_0$$



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

# 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)  $eV = \epsilon_2 \neq \epsilon_1$ ; в)  $eV \neq \epsilon_2 \neq \epsilon_1$



# 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.