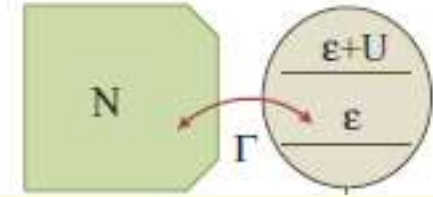
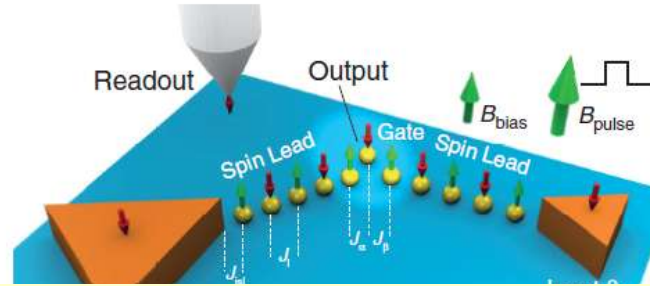


***Особенности отклика двухуровневой
квантовой точки на резонансное внешнее поле
при наличии кулоновских корреляций***

В.Н. Манцевич

Н.С. Маслова, П.И. Арсеев

Современное состояние исследований электронного транспорта в наноструктурах

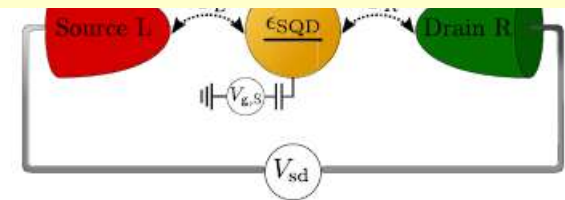
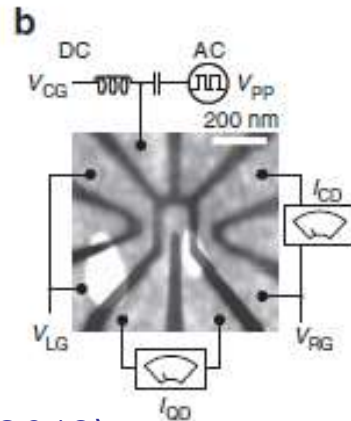
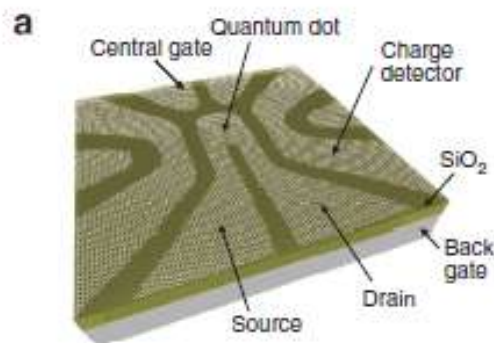


Современные устройства наноэлектроники:

Новые типы приборов наноэлектроники: зарядовых переключателей, устройств памяти, одноэлектронных квантовых насосов и турникетов, квантовых излучателей коротких импульсов.

Исследование фундаментальных физических явлений:

1. Кулоновские и электрон-фононные корреляции.
2. Модификация локальной электронной структуры вблизи зарядовых локализованных состояний.
3. Нестационарный и неравновесный электронный транспорт.



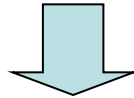
C. Volk et al.,
Nature Comm. **4**:1753, (2013)

L.D. Contreras et al.,
Phys. Rev. B **89**, 195305, (2014)

Введение

Одна из основных задач нанoeлектроники:

Контролируемое изменение зарядовых и спиновых состояний в системах сверхмалых размеров для создания переключателей, турникетов.



Развитие источников света сделало возможным осуществлять контроль за зарядовыми состояниями не только с помощью затворов, но и с помощью лазерных импульсов.

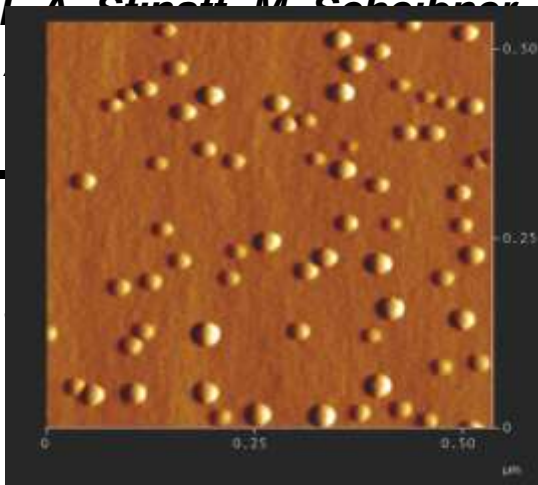
Экспериментальные конфигурации квантовых точек:

Планарная конфигурация

Вертикальная конфигурация

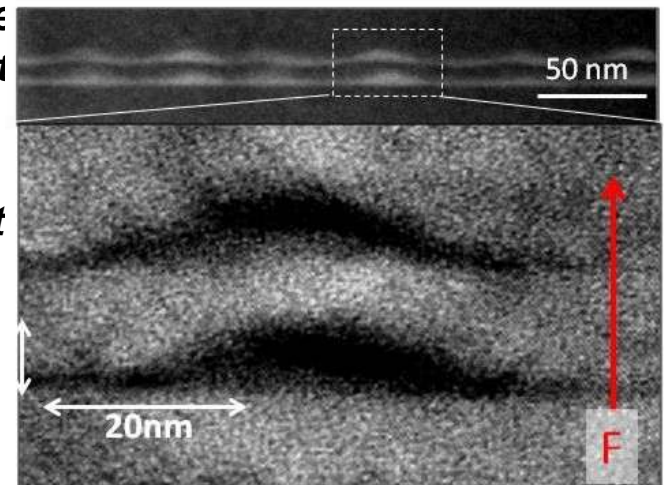
1. Планарные квантовые точки

- F.A. Steingard, M. Scheibner, A.S. Bracker, et al., *Science* 302 (2003) 1731
- C. Matthiesen, et al., *Nature* 414 (2001) 352



2. Вертикальные квантовые точки

- J. L. Rouy, J.I. Climente, et al., *Phys. Rev. B* 82 (2010) 235314
- *Phys. Rev. B* 82 (2010) 235314



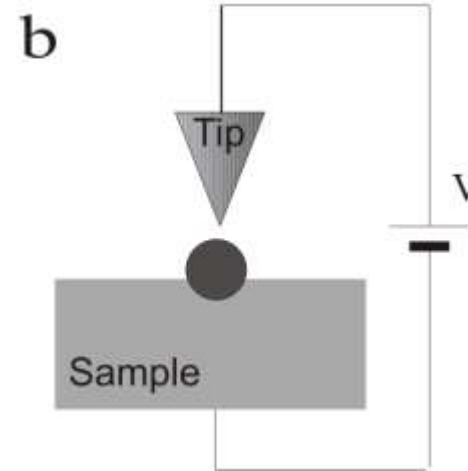
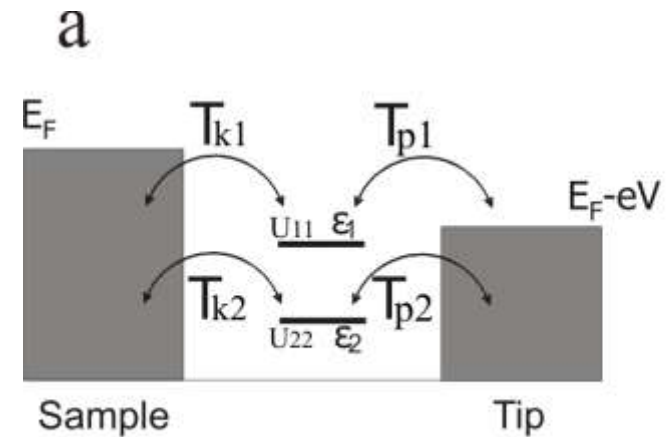
Модель двухуровневой квантовой точки

$$\hat{H} = \sum_{\sigma, l=1}^2 c_{l\sigma}^+ c_{l\sigma} \tilde{\epsilon}_l + \sum_{\sigma, l=1}^2 U_l \hat{n}_{l\sigma} \hat{n}_{l-\sigma} + \sum_{\sigma} \frac{\Omega}{2} (c_{1\sigma}^+ c_{2\sigma} + c_{2\sigma}^+ c_{1\sigma}),$$

$$\Omega = 2d_{12} \cdot E$$

$$\hat{H}_{\text{tun}} = \sum_{k\sigma} T_{k1} (c_{k\sigma}^+ c_{\sigma 1} + c_{\sigma 1}^+ c_{k\sigma})$$

$$+ \sum_{p\sigma} T_{p1} (c_{p\sigma}^+ c_{\sigma 1} + c_{\sigma 1}^+ c_{p\sigma}) + (1 \leftrightarrow 2),$$



1. Управление туннельным током внешним резонансным полем
2. Изменение восприимчивости системы при протекании туннельного тока

Волновые функции и энергии многоэлектронных состояний

Одночастичные состояния

$$\Psi_i^\sigma = \mu_i \cdot |0 \uparrow\rangle |00\rangle + \nu_i \cdot |00\rangle |0 \uparrow\rangle$$

$$\varepsilon_{a(s)} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \pm \sqrt{\frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}{4} + T^2}$$

Двухчастичные состояния

$$\Psi_j^{\sigma-\sigma} = \alpha_j \cdot |\uparrow\downarrow\rangle |00\rangle + \beta_k \cdot |\downarrow 0\rangle |0 \uparrow\rangle + \gamma_j \cdot |0 \uparrow\rangle |\downarrow 0\rangle + \delta_j \cdot |00\rangle |\uparrow\downarrow\rangle.$$

Трехчастичные состояния

$$\Psi_m^{\sigma\sigma-\sigma} = p_m |\uparrow\downarrow\rangle |\uparrow\rangle + q_m |\uparrow\rangle |\uparrow\downarrow\rangle$$
$$m = \pm 1$$

$$\varepsilon_m = \frac{3\varepsilon_1 + 3\varepsilon_2 + U_1 + U_2}{2} \pm \sqrt{\frac{(3\varepsilon_1 + 3\varepsilon_2 + U_1 + U_2)^2}{4} + T^2}$$

Четырехчастичные состояния

$$\Psi_n = |\uparrow\downarrow\rangle |\uparrow\downarrow\rangle.$$

Псевдочастичные операторы

$$f_{i\sigma}^+ |0\rangle \longrightarrow (\mu_i c_{1\sigma}^+ + \nu_i c_{2\sigma}^+) |0\rangle$$

$$d_j^{+\sigma-\sigma} |0\rangle \longrightarrow (\alpha_j c_{1\sigma}^+ c_{1-\sigma}^+ + \beta_j c_{1\sigma}^+ c_{2-\sigma}^+ + \gamma_j c_{1-\sigma}^+ c_{2\sigma}^+ + \delta_j c_{2\sigma}^+ c_{2-\sigma}^+) |0\rangle$$

$$d_j^{+\sigma\sigma} |0\rangle \longrightarrow c_{1\sigma}^+ c_{2\sigma}^+ |0\rangle$$

$$\psi_m^{+\sigma\sigma-\sigma} |0\rangle \longrightarrow (p_m c_{2\sigma}^+ c_{1\sigma}^+ c_{1-\sigma}^+ + q_m c_{1\sigma}^+ c_{2\sigma}^+ c_{2-\sigma}^+) |0\rangle$$

$$\varphi^+ |0\rangle \longrightarrow (c_{1\sigma}^+ c_{1-\sigma}^+ c_{2\sigma}^+ c_{2-\sigma}^+) |0\rangle$$

Электронный оператор можно представить в виде комбинации псевдочастичных операторов

$$\begin{aligned} c_{\sigma l}^+ &= \sum_i X_i^{\sigma l} f_{\sigma i}^+ b + \sum_{j,i} Y_{ji}^{\sigma-\sigma l} d_j^{+\sigma-\sigma} f_{i-\sigma} \\ &+ \sum_i Y_i^{\sigma\sigma l} d^{+\sigma\sigma} f_{i\sigma} + \sum_{m,j} Z_{mj}^{\sigma\sigma-\sigma l} \psi_{m-\sigma}^+ d_j^{\sigma-\sigma} \\ &+ \sum_m Z_m^{\sigma-\sigma-\sigma l} \psi_{m\sigma}^+ d^{-\sigma-\sigma} + \sum_m W_m^{\sigma-\sigma-\sigma l} \varphi^+ \psi_{m\sigma} \end{aligned}$$

Матричные элементы и ограничение на пространство состояний

$$\begin{aligned}X_i^{\sigma l} &= \langle \psi_i^\sigma | c_{\sigma l}^+ | 0 \rangle, \\Y_{ji}^{\sigma-\sigma l} &= \langle \psi_j^{\sigma-\sigma} | c_{\sigma l}^+ | \psi_i^{-\sigma} \rangle, \\Y_{ji}^{\sigma\sigma l} &= \langle \psi_j^{\sigma\sigma} | c_{\sigma l}^+ | \psi_i^\sigma \rangle, \\Z_{mj}^{\sigma\sigma-\sigma l} &= \langle \psi_m^{\sigma\sigma-\sigma} | c_{\sigma l}^+ | \psi_j^{\sigma-\sigma} \rangle, \\Z_m^{\sigma-\sigma-\sigma l} &= \langle \psi_m^{\sigma-\sigma-\sigma} | c_{\sigma l}^+ | \psi_j^{\sigma-\sigma-\sigma} \rangle, \\W_m^{\sigma-\sigma-\sigma l} &= \langle \psi_m^{\sigma\sigma-\sigma-\sigma} | c_{\sigma l}^+ | \psi_m^{\sigma-\sigma-\sigma} \rangle,\end{aligned}$$

Используемое приближение приводит к ограничению на пространство возможных физических состояний системы

$$\hat{n}_b + \sum_{i\sigma} \hat{n}_{fi\sigma} + \sum_{j\sigma\sigma'} \hat{n}_{dj}^{\sigma\sigma'} + \sum_{m\sigma} \hat{n}_{\psi m\sigma} + \hat{n}_\psi = 1$$

Разрешены состояния только с одной псевдочастицей

Электронные числа заполнения и гамильтониан в псевдочастичном представлении

$$\begin{aligned} \hat{n}_\sigma^{el} = & \sum_l c_{\sigma l}^+ c_{\sigma l} = \sum_{i,l} |X_i^{\sigma l}|^2 \hat{n}_{fi\sigma} + \sum_{i,j,l} |Y_{ji}^{\sigma-\sigma l}|^2 \hat{n}_{dj}^{\sigma-\sigma} \\ & + \sum_{i,l} |Y_{ji}^{\sigma\sigma l}|^2 \hat{n}_{dj}^{\sigma\sigma} + \sum_{m,j,l} |Z_{mj}^{\sigma\sigma-\sigma l}|^2 \hat{n}_{\psi m-\sigma} \\ & + \sum_{m,l} |Z_{mj}^{-\sigma-\sigma\sigma l}|^2 \hat{n}_{\psi m\sigma} + \sum_{m,l} |W_m^{\sigma-\sigma-\sigma l}|^2 \hat{n}_\varphi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{H}_0 = & \sum_{i\sigma} \varepsilon_i f_{i\sigma}^+ f_{i\sigma} + \sum_{j\sigma\sigma'} E_{IIj}^{\sigma\sigma'} d_j^{+\sigma\sigma'} d_j^{\sigma\sigma'} \\ & + \sum_{m\sigma} E_{III}^{m\sigma} \Psi_{m\sigma}^+ \Psi_{m\sigma} + E_{IV} \Phi_\sigma^+ \Phi_\sigma \end{aligned}$$

**Наличие сильного взаимодействия: ограничение на число псевдочастиц
и более сложный нелинейный вид взаимодействия с резервуаром**

Поляризация и восприимчивость

поляризация

$$P / E_{dot} \propto \langle c_1^+ c_2 \rangle$$

$$E_{dot} \sim e/a^2$$

восприимчивость

$$\text{Im } \chi \propto \frac{U \langle c_1^+ c_2 \rangle}{\Omega}$$

$$U \sim e^2/a$$

$$\begin{aligned} \sum_{\sigma} c_{1\sigma}^+ c_{2\sigma} &= \sum_i X_i^{\sigma 1} X_i^{\sigma 2*} \hat{n}_{fi\sigma} \\ &+ \sum_{ij} Y_{ji}^{\sigma-\sigma 1} Y_{ji}^{\sigma-\sigma 2*} \hat{n}_{dj}^{\sigma-\sigma} + \sum_{ij} Y_{ji}^{\sigma\sigma 1} Y_{ji}^{\sigma\sigma 2*} \hat{n}_{gj}^{\sigma\sigma} \\ &+ \sum_{mj} Z_{mj}^{\sigma\sigma-\sigma 1} Z_{mj}^{\sigma\sigma-\sigma 2*} \hat{n}_{\psi m-\sigma} \\ &+ \sum_m W_m^{\sigma-\sigma-\sigma 1} W_m^{\sigma-\sigma-\sigma 2*} \hat{n}_{\varphi} \end{aligned}$$

$$T_{k1} \gg T_{p1}$$

$$T_{p2} \gg T_{k2}$$

$$\Gamma_{k(p)i} = \pi v_0 T_{k(p)i}^2$$

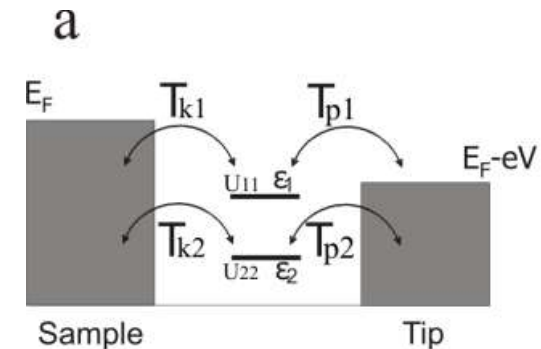
Появление инверсной населенности в двухуровневой системе при протекании туннельного тока

Неравновесное заполнение электронных уровней

$$n_i = \frac{\Gamma_{ki} n_k + \Gamma_{pi} n_p}{\Gamma_i},$$

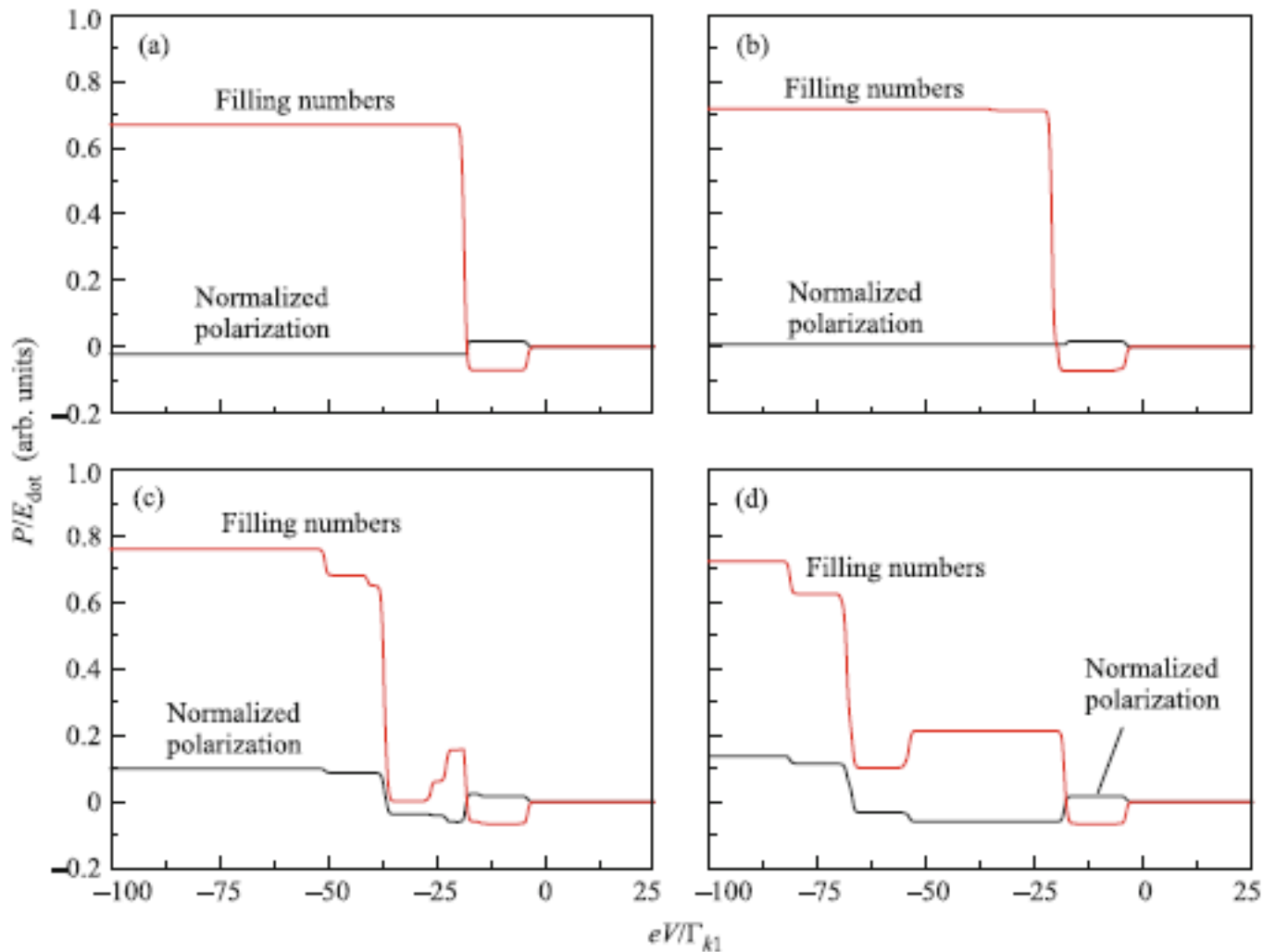
$$i = 1, 2$$

$$n_1 - n_2 = \frac{(\Gamma_{k1} \Gamma_{p2} - \Gamma_{k2} \Gamma_{p1})(n_k - n_p)^2}{\Gamma_1 \Gamma_2},$$



Изменение соотношения между скоростями туннельных переходов в берега контакта может приводить к инверсной заселенности

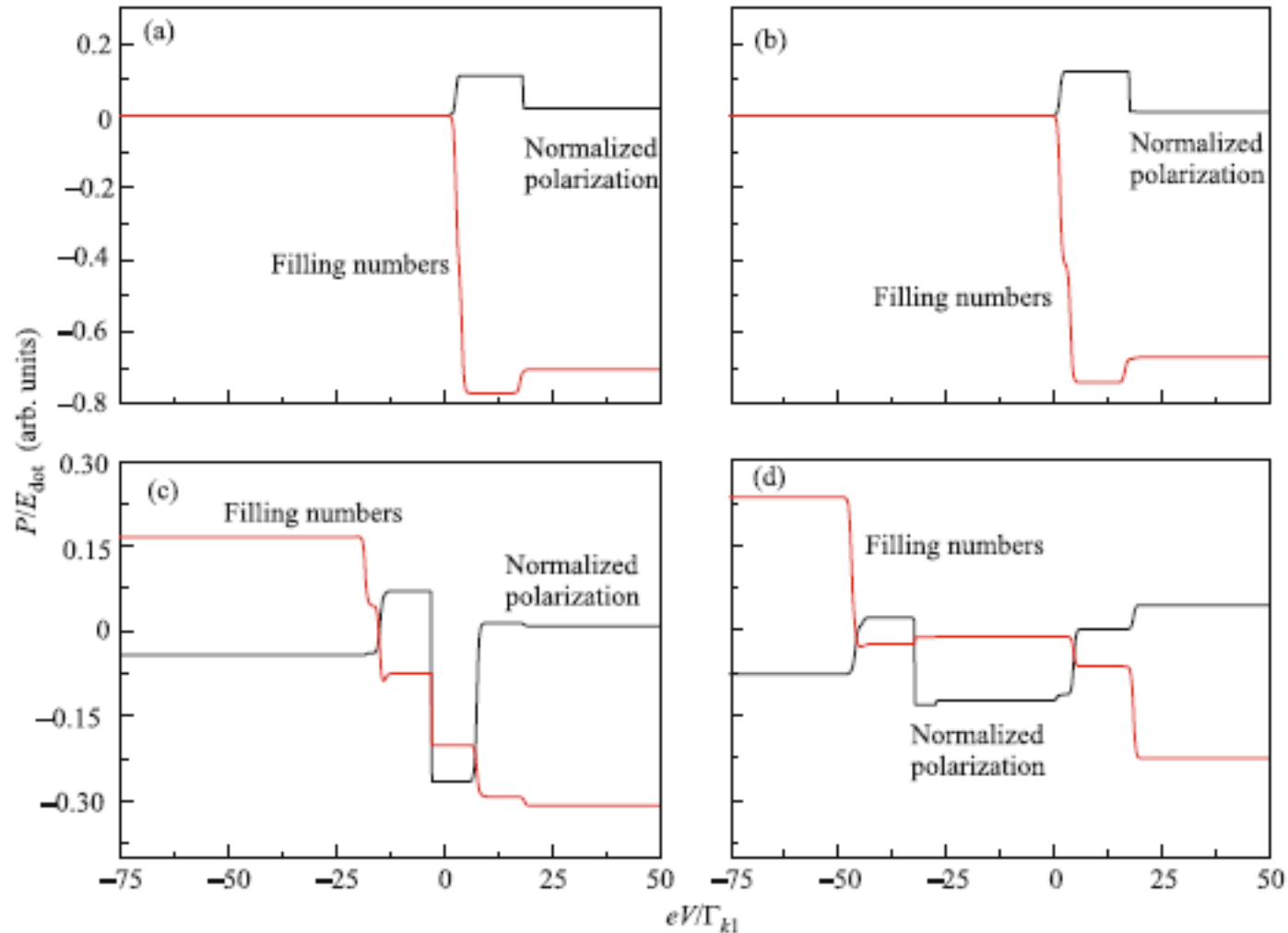
Числа заполнения и поляризация



(a) $U/\Gamma_{k1} = 0$; (b) $U/\Gamma_{k1} = 2.5$; (c) $U/\Gamma_{k1} = 18.75$; (d) $U/\Gamma_{k1} = 50$

$$\varepsilon_1/\Gamma_{k1} = 17.5, \varepsilon_2/\Gamma_{k1} = 5, \Omega/\Gamma_{k1} = 7.5, \Gamma_{k1} = \Gamma_{p2} = 1, \Gamma_{k2}/\Gamma_{k1} = \Gamma_{p1}/\Gamma_{k1} = 0.125$$

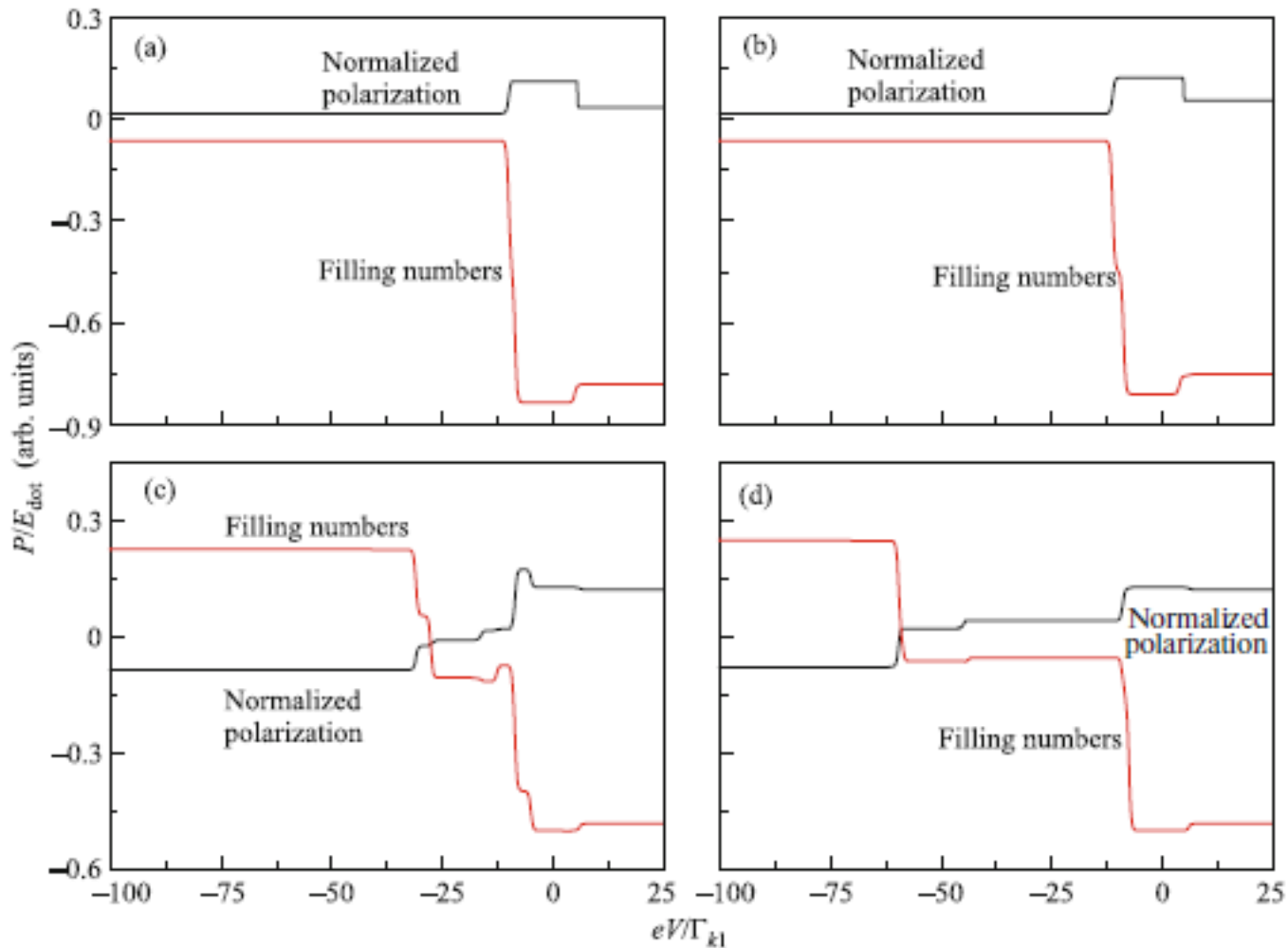
Числа заполнения и поляризация



(a) $U/\Gamma_{k1} = 0$; (b) $U/\Gamma_{k1} = 2.5$; (c) $U/\Gamma_{k1} = 18.75$; (d) $U/\Gamma_{k1} = 50$

$$\varepsilon_1/\Gamma_{k1} = -5, \varepsilon_2/\Gamma_{k1} = -17.5, \Omega/\Gamma_{k1} = 7.5, \Gamma_{k1} = \Gamma_{p2} = 1, \Gamma_{k2}/\Gamma_{k1} = \Gamma_{p1}/\Gamma_{k1} = 0.125$$

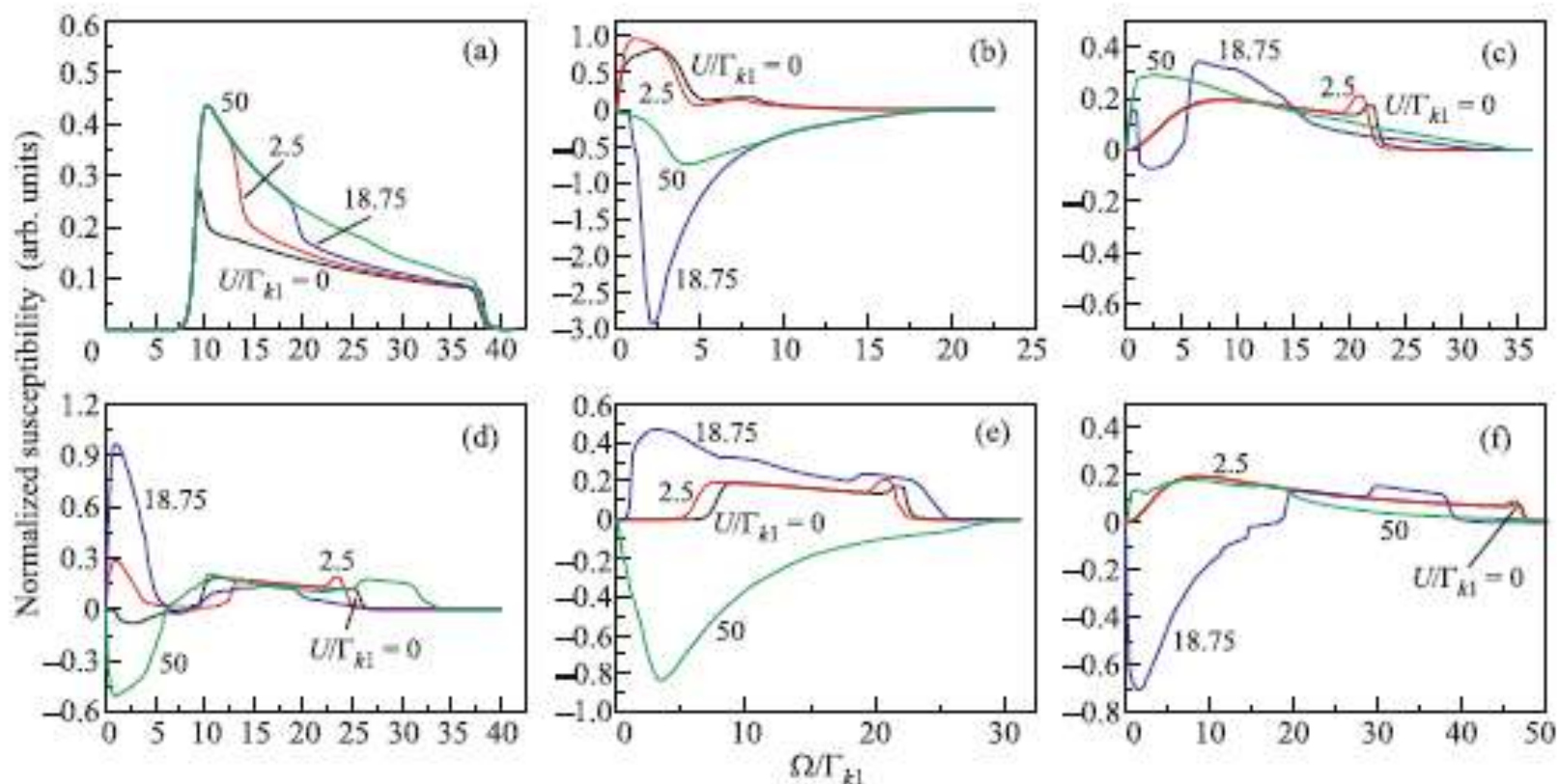
Числа заполнения и поляризация



(a) $U/\Gamma_{k1} = 0$; (b) $U/\Gamma_{k1} = 2.5$; (c) $U/\Gamma_{k1} = 18.75$; (d) $U/\Gamma_{k1} = 50$

$$\varepsilon_1/\Gamma_{k1} = 7.5, \varepsilon_2/\Gamma_{k1} = -5, \Omega/\Gamma_{k1} = 7.5, \Gamma_{k1} = \Gamma_{p2} = 1$$

Восприимчивость



(a) $eV/\Gamma_{k1} = 50$; (b) $eV/\Gamma_{k1} = 3.75$; (c) $eV/\Gamma_{k1} = -25$; (d) $eV/\Gamma_{k1} = -37.5$;

(e) $eV/\Gamma_{k1} = -12.5$; (f) $eV/\Gamma_{k1} = -50$

(a, d) $\varepsilon_1/\Gamma_{k1} = 17.5$, $\varepsilon_2/\Gamma_{k1} = 5$; (b, e) $\varepsilon_1/\Gamma_{k1} = -5$, $\varepsilon_2/\Gamma_{k1} = -17.5$; (c, f) $\varepsilon_1/\Gamma_{k1} = 7.5$,

$\varepsilon_2/\Gamma_{k1} = -5$

$\Gamma_{k1} = \Gamma_{p2} = 1$, $\Gamma_{k2}/\Gamma_{k1} = \Gamma_{p1}/\Gamma_{k1} = 0.125$

Выводы

Проанализировано поведение поляризуемости, восприимчивости и разности электронных чисел заполнения для двухуровневой системы с кулоновскими корреляциями в широком диапазоне напряжений при различных значениях частоты Раби.

Показано, что поляризуемость и восприимчивость определяются не только разностью электронных чисел заполнения, но и сильно зависят от высших корреляционных функций локализованных электронов.

Обнаружено, что поляризуемость и восприимчивость могут значительно возрасти и даже изменять знак в зависимости от величины напряжения на туннельном контакте, частоты Раби и кулоновского взаимодействия.

N.S. Maslova, V.N. Mantsevich, P.I. Arseyev, The effect of Coulomb correlations on the two-level quantum dot susceptibility and polarization, JETP Letters V.102(8), p 536-543, 2015