

Спин-поляризованный электронный транспорт в коррелированных полупроводниковых наноструктурах

Фролов Д.А.¹, Манцевич В.Н.¹, Маслова Н.С.¹, Рожанский И.В.², Аверкиев Н.С.²

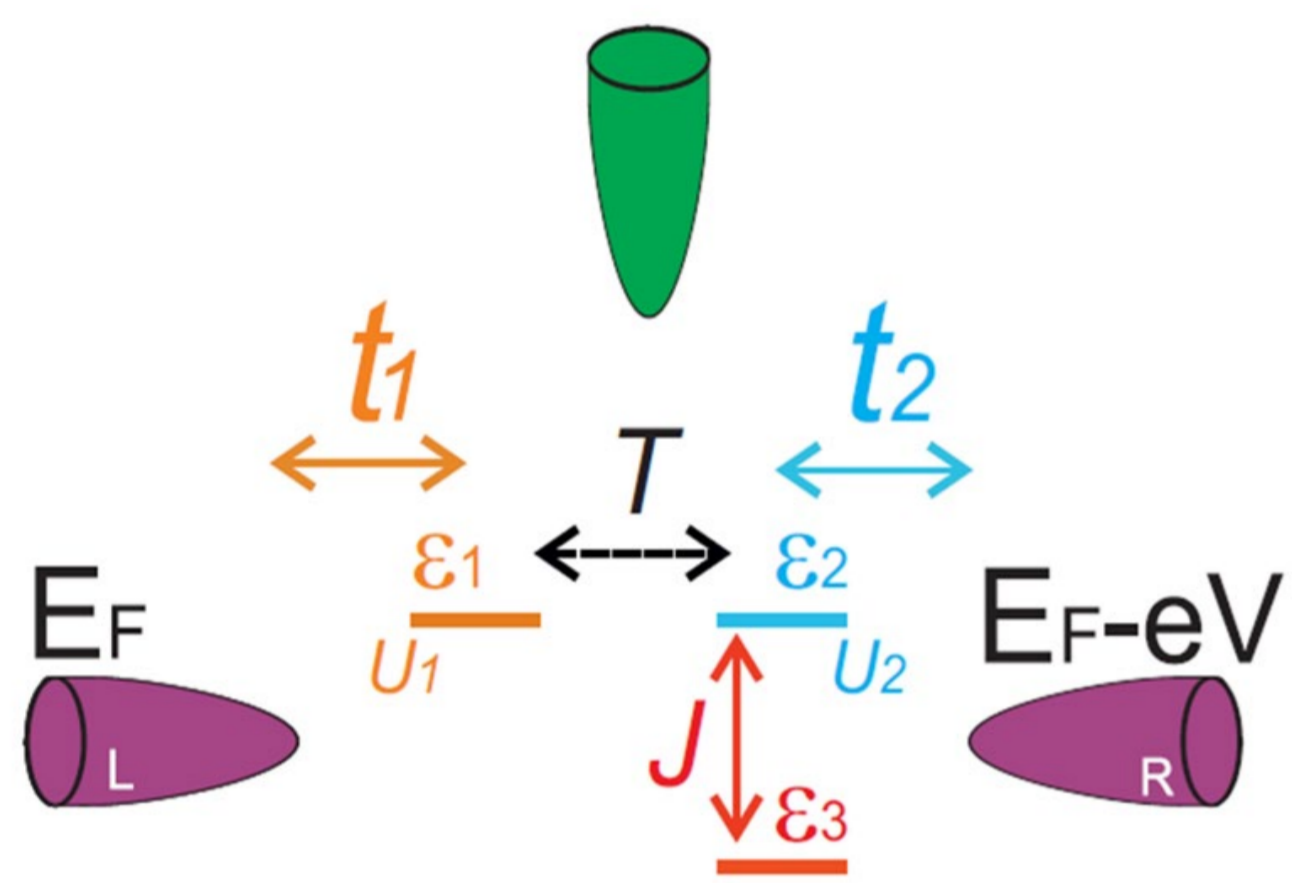
¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия ²Институт им. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Фролов Дмитрий Алексеевич frolovd42@gmail.com

В данной работе предложена новая теоретическая концепция электрически управляемого одноэлектронного спинового фильтра (поляризатора), базирующегося на системе взаимодействующих квантовых точек или примесных атомов, при наличии сильного кулоновского и обменного взаимодействия.

Теоретический анализ специфики электронного транспорта в исследуемой системе выполнен с использованием подхода, основанного на кинетических уравнениях для чисел заполнения и их корреляционных функций. Проведено численное моделирование спин-поляризованных токов и спиновой поляризации для различных соотношений параметров системы (констант туннельной связи, величин обменного и кулоновского взаимодействий).

Схема системы



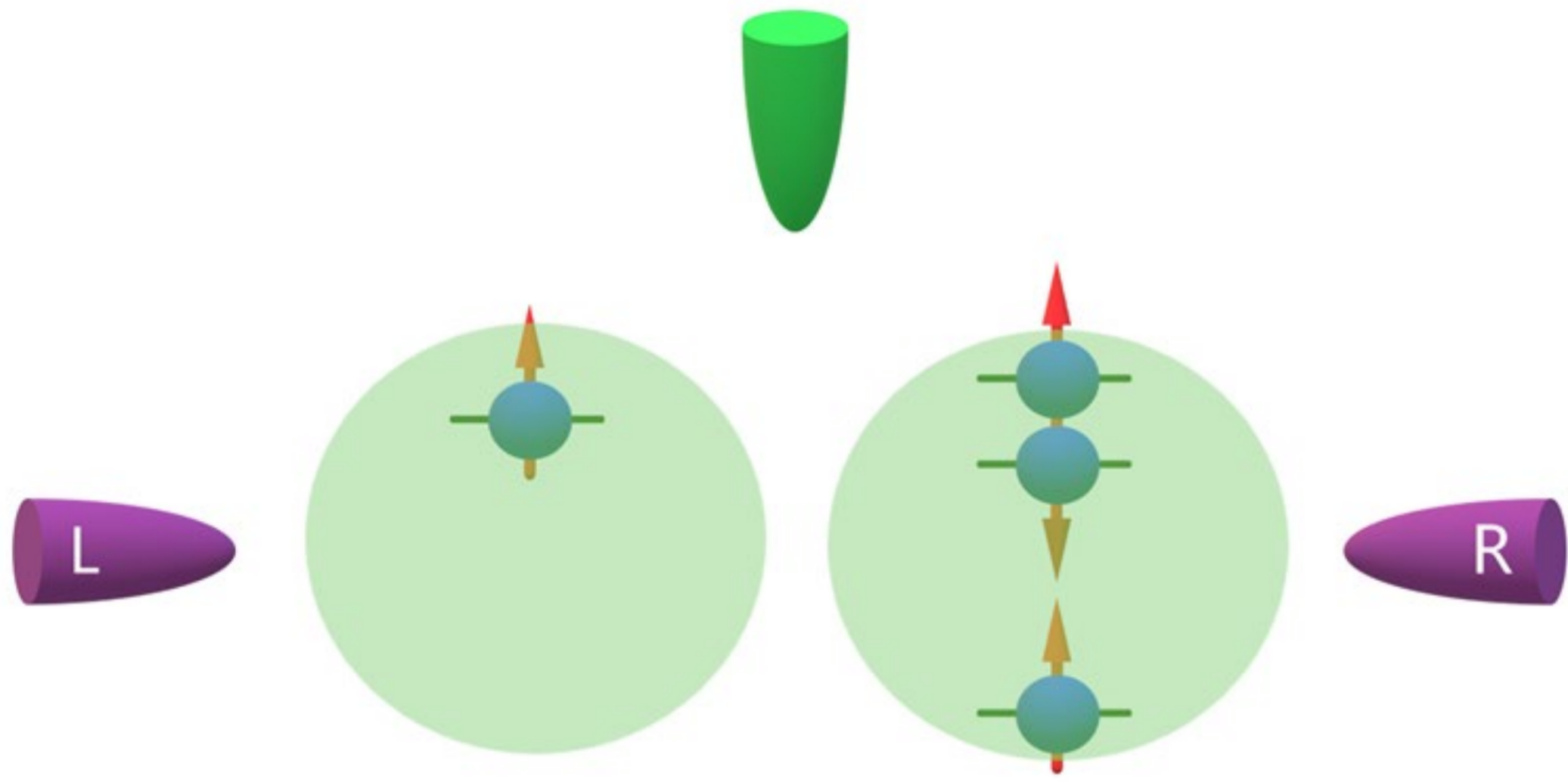
Гамильтониан

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

Обозначения

- E_F - энергия Ферми
- eV - напряжение смещения
- $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ - одноэлектронные уровни энергии квантовых точек
- T - амплитуда тунnelирования
- U_1, U_2 - константы кулоновского отталкивания на уровнях энергий
- t_1, t_2 - амплитуды тунnelирования между системой КТ и берегами туннельного контакта
- J - константа обменного взаимодействия
- Зеленый контакт позволяет изменять «Т» путем подачи напряжения

Модель системы



Теория

$$\hat{H}_0 = \sum_{i,\sigma} \epsilon_i \hat{c}_{i\sigma}^\dagger \hat{c}_{i\sigma} + \sum_{k,\sigma} \epsilon_k \hat{c}_{k\sigma}^\dagger \hat{c}_{k\sigma} + \sum_{p,\sigma} (\epsilon_p - eV) \hat{c}_{p\sigma}^\dagger \hat{c}_{p\sigma} + T \sum_{\sigma} (\hat{c}_{1\sigma}^\dagger \hat{c}_{2\sigma} + \hat{c}_{2\sigma}^\dagger \hat{c}_{1\sigma})$$

$$\hat{H}_{tun} = t_1 \sum_{k,\sigma} (\hat{c}_{k\sigma}^\dagger \hat{c}_{1\sigma} + \hat{c}_{1\sigma}^\dagger \hat{c}_{k\sigma}) + t_2 \sum_{p,\sigma} (\hat{c}_{p\sigma}^\dagger \hat{c}_{2\sigma} + \hat{c}_{2\sigma}^\dagger \hat{c}_{p\sigma}) + t_3 \sum_{p,\sigma} (\hat{c}_{p\sigma}^\dagger \hat{c}_{3\sigma} + \hat{c}_{3\sigma}^\dagger \hat{c}_{p\sigma})$$

$$\hat{H}_{int} = \sum_{i=1,2} U_i \hat{n}_i^\sigma \hat{n}_i^{-\sigma} + U_{23} (\hat{n}_2^\sigma - \hat{n}_2^{-\sigma}) (\hat{n}_3^\sigma - \hat{n}_3^{-\sigma}) + J (\hat{n}_2^\sigma - \hat{n}_2^{-\sigma}) (\hat{n}_3^\sigma - \hat{n}_3^{-\sigma})$$

Уравнения движения

$$\begin{aligned} \hat{I}_p^\pm &= t_2 \sum_p (\hat{n}_{p2}^{\pm\sigma} - \hat{n}_{2p}^{\pm\sigma}) \\ P &= \frac{I^+ - I^-}{I^+ + I^-} \Rightarrow \frac{d}{dt} A = \frac{i}{\hbar} [H, A] \Rightarrow \frac{d\hat{n}_2^\sigma}{dt} = iT(\hat{n}_{12}^\sigma - \hat{n}_{21}^\sigma) + it_2 \sum_p (\hat{n}_{p2}^\sigma - \hat{n}_{2p}^\sigma) \\ \hat{n}_{ij}^\sigma &= \hat{c}_{i\sigma}^\dagger \hat{c}_{j\sigma} \end{aligned}$$

$$\frac{d\hat{n}_{12}^\sigma}{dt} = i[\tilde{\epsilon}_1 - \tilde{\epsilon}_2 - T]\hat{n}_{12}^\sigma + i[U_1 K_{1112}^{-\sigma\sigma} - U_2 K_{2212}^{-\sigma\sigma}] \rightarrow \hat{K}_{lr'l'r'}^{\sigma\sigma'} = \langle \hat{n}_{lr}^\sigma \hat{n}_{l'r'}^{\sigma'} \rangle$$

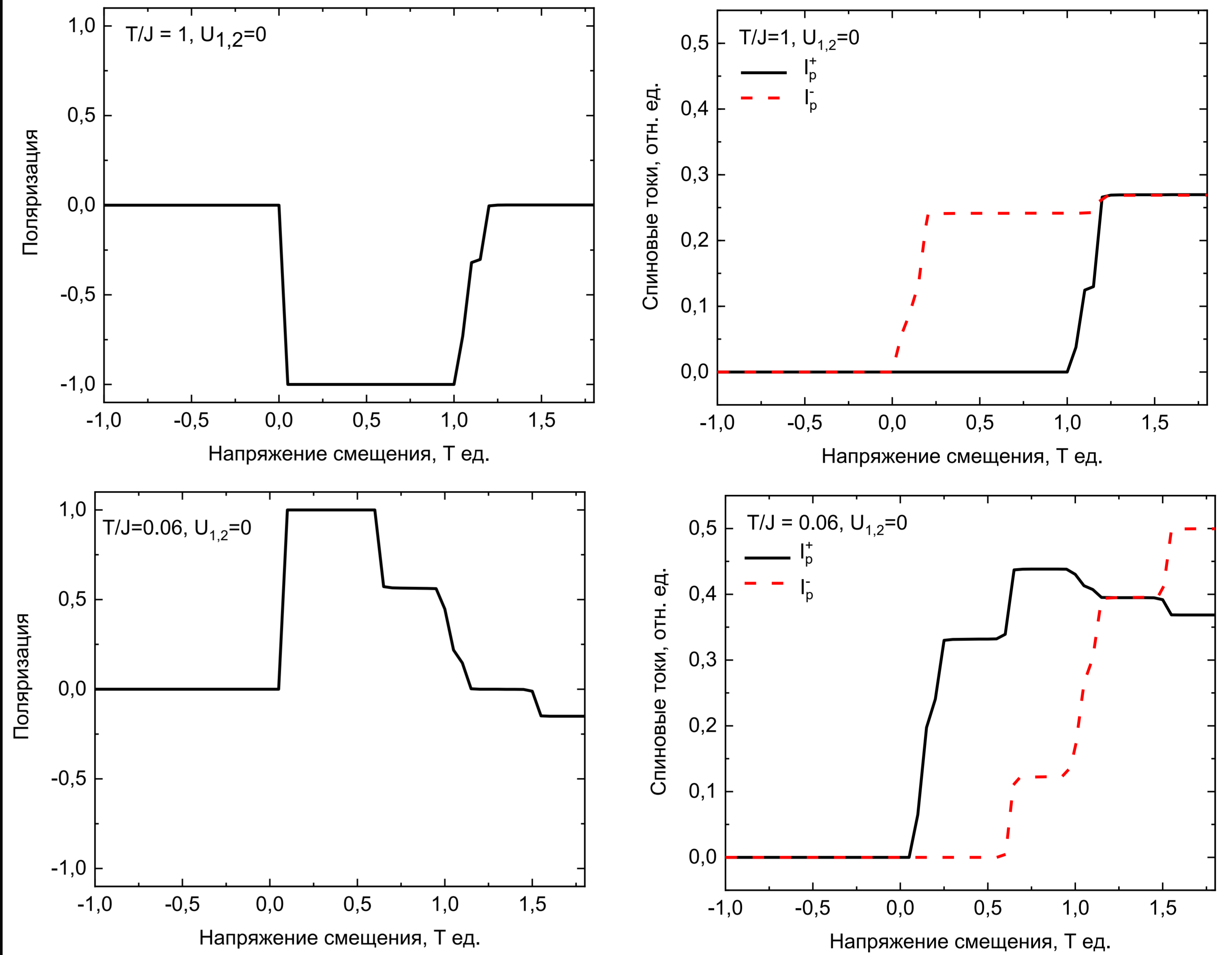
$$+ i(J - U_{23})K_{3312}^{\sigma\sigma} - i(J + U_{23})K_{3312}^{-\sigma\sigma} + it_1 \hat{n}_{k2}^\sigma - it_2 \hat{n}_{1p}^\sigma \quad \downarrow$$

N. S. Maslova, I. V. Rozhansky, V. N. Mantsevich, P. I. Arseyev, N. S. Averkiev, E. Lähderanta, Dynamic spin injection into a quantum well coupled to a spin-split bound state, Phys. Rev. B 97, 195445 (2018).

$$\frac{\partial \langle \hat{n}_{lr}^\sigma \hat{n}_{l'r'}^{\sigma'} \rangle}{\partial t} = \frac{\partial \hat{n}_{lr}^\sigma}{\partial t} \hat{n}_{l'r'}^{\sigma'} + \hat{n}_{lr}^\sigma \frac{\partial \hat{n}_{l'r'}^{\sigma'}}{\partial t}$$

Спиновые токи и поляризация

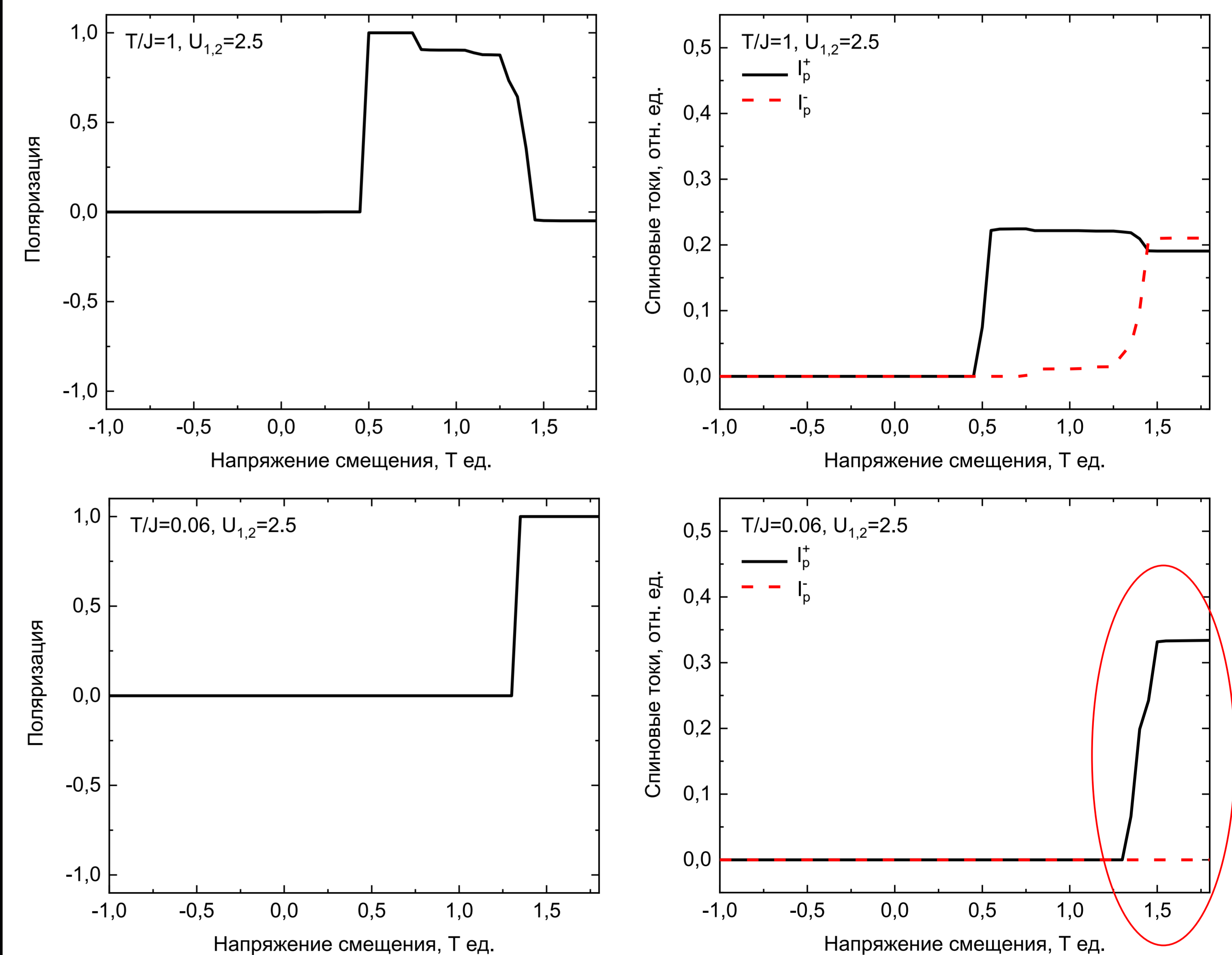
Часть 1



V.N. Mantsevich, I.V. Rozhansky, D.A. Frolov, N.S. Maslova, N.S. Averkiev, Effective spin filtering in correlated semiconductor nanostructures, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 587, 171357 (2023)

Спиновые токи и поляризация

Часть 2



V.N. Mantsevich, I.V. Rozhansky, D.A. Frolov, N.S. Maslova, N.S. Averkiev, Effective spin filtering in correlated semiconductor nanostructures, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 587, 171357 (2023)

Выводы

Спиновую поляризацию туннельного тока через исследуемую систему можно эффективно контролировать двумя методами: 1) за счет изменения величины напряжения, приложенного к туннельному контакту, и 2) за счет варьирования туннельной связи между квантовыми точками с помощью внешнего затвора, что позволяет использовать данную систему в качестве спинового фильтра. Обменное взаимодействие расщепляет один из уровней на два спиновых подуровня. В зависимости от параметров системы энергетическая разница между подуровнями спина-вверх и спина-вниз может инвертироваться, что позволяет менять знак поляризации тока, проходящего через систему.