Нестационарная теория переноса заряда на основе подхода много-частичной волновой функции и ее применение к SIS-переходу

Г. Л. Ставиский[1], *Л. Е. Федичкин*[1]

[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

SIS-переходы вызывают большой практический интерес в самых разных областях: сверхпроводящие квантовые вычисления, детекторы магнитного потока, детекторы света. В последней области практическое применение таких структур уже является обычным делом.

SIS-переходы используются для создания гетеродинного приемника: при падении света, даже очень малой интенсивности, на контакт, введенный в состояние так называемой «первой ступеньки», и наличии в цепи генератора переменного напряжения, переход генерирует нелинейный отклик в виде тока на разности частот света и генератора. Этот метод анализа излучения в радиоастрономии до сих пор остается одним из самых точных и чувствительных [1].

В действительности, для создания гетеродинного приемника не необходим именно сверхпроводящий туннельный контакт: подойдет любой элемент цепи с нелинейным откликом на падающее излучение. Теория, описывающая «накачку» SIS-переходов излучением, была предложена еще в 1979 году [2] и до сих пор является основной в области (на нее ссылаются как на «Теорию Такера» или «Теорию линейного отклика»). Несмотря на то, что она крайне эффективна в практическом смысле, в ней существуют некоторые проблемы. В работе [2] и более ранних трудах, автор использует теорию возмущений по Бардиновскому туннельному гамильтониану в первом порядке для вывода выражений для компонент «тока накачки» (в представлении взаимодействия):

$$\mathrm{i}\hbar\frac{\mathrm{dU_I}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{H_T U_I} \tag{1}$$

$$\mathrm{U_I} = 1 - \frac{\mathrm{i}}{\hbar}\int_{-\infty}^{\mathrm{t}} \mathrm{e}^{\delta \mathrm{t}}\,\mathrm{H_T(t')dt'} \tag{2}$$

Где в последнем выражении берется предел $\delta \to 0$, который в КТП и теории неравновесных процессов в квантовых системах называется «Адиабатическим пределом», по факту отображающим то, что на бесконечности система находится в равновесии. Это не вполне естественный способ ввести необратимость в уравнения, более того, не всегда корректный для неравновесных систем. К тому же, такой подход может не подойти для анализа в случае зависимости от времени самих туннельных амплитуд Бардина в H_T. Также, ввиду того что в работе [2] автор работает только с операторами тока, анализ квантовых шумов также несколько ограничен.

Мы предлагаем альтернативную, непертурбативную теорию накачки SIS-переходов, основанную на методе много-частичной волновой функции квазичастиц SIS-перехода, восходящем к идеям Ш. Гурвица [3]. Мы обобщаем вывод Master equations для случаев, когда потенциал на контакте периодически зависит от времени, что не было сделано ранее в данном формализме (ранее рассматривались только случаи зависимости от времени уровней в квантовых точках, [4]). В действительности, данный метод может быть применен к любой много-частичной ферми системе. В итоге, в Марковском приближении, мы получаем:

$$\frac{d\sigma^n}{dt} = \left(\sum_{N=-\infty}^{\infty} \mathrm{Re}(\Gamma_{N\hbar\omega}) \cos(N\omega t) + \mathrm{Im}(\Gamma_{N\hbar\omega}) \sin(N\omega t)\right)(\sigma^{n-1} - \sigma^n), \quad (3)$$

где:

$$\Gamma_{N\hbar\omega} = \sum_{M=-\infty}^{\infty} J_M (-1)^M J_{N-M} \big(\Gamma(V_0 + M\hbar\omega) + i\Gamma_{KK}(V_0 + M\hbar\omega)\big) \quad (4)$$

$\Gamma(V)$ – ширина уровней в контакте при постоянном напряжении, пропорциональная току, $\Gamma_{KK}(V)$ – Крамерс-Крониг преобразование ширин, отвечающее «реактивной» части отклика контакта на напряжение, ω – частота падающего света, σ^n – вероятность протекания n частиц на правый берег к моменту времени t, V_0 – изначальное напряжение на контакте. Полученные выражения для тока полностью совпадают с результатами «Теории Такера». В этом формализме можно формально получить разнообразную статистику тока, например, воспользовавшись формулой МакДональда [5] для спектра мощности стационарного процесса (наш процесс является квазистационарным ввиду периодичности, и это может быть учтено перенормировочной экспонентой):

$$\frac{S(\omega)}{2e^2} = \omega \int_0^{+\infty} \sum_{n=0}^{+\infty} n^2 \frac{d\sigma^n}{dt} \sin(\omega t) dt,$$

Также, подобный подход позволяет непертурбативно анализировать случай периодической зависимости от времени самих коэффициентов Бардина для нефеноменологического рассмотрения взаимодействия излучения с SIS-переходом, в отличии от традиционно применяемой теории возмущений, например в [6]. Формализм Master equation позволяет нам рассматривать в том числе и изначально неравновесные распределения в контакте, добавляя неоднородные члены в цепочку уравнений (3).

1. Wengler, Michael. (1992). Submillimeter-Wave Detection with Superconducting Tunnel Diodes. Proceedings of the IEEE. 80. 1810 - 1826. 10.1109/5.175257.
2. Tucker, John R. and Marc J. Feldman. “Quantum detection at millimeter wavelengths.” *Reviews of Modern Physics* 57 (1985): 1055-1113.
3. Gurvitz, S. (1997). Rate equations for quantum transport in multidot systems. *Physical Review B, 57,* 6602-6611.
4. Gurvitz, Shmuel. (2015). Single-electron approach for time-dependent electron transport. Physica Scripta. T165. 10.1088/0031-8949/2015/T165/014013.
5. *MacDonald D.K.C.* Noise and fluctuations: an introduction. — New York: John Wiley and sons, Inc, 1962
6. Davids, Paul & Shank, Joshua. (2017). Density matrix approach to photon-assisted tunneling in the transfer Hamiltonian formalism. Physical Review B. 97. 10.1103/PhysRevB.97.075411.