

# Оптимизация схемы баллистического детектора

И. И. Соловьев<sup>1, 6, \*</sup>, Н. В. Кленов<sup>2, 6</sup>, А. Л. Панкратов<sup>3, 6, §</sup>, Е. В. Ильичев<sup>4, 6</sup>, Л. С. Кузьмин<sup>5, 6</sup>

1 НИИЯФ имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

2 Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы, 1.

3 Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород.

4 Institute of Photonic Technology, Jena, Germany.

5 Chalmers University of Technology, Sweden.

6 Лаборатория криогенной нанозлектроники, НГТУ, Нижний Новгород.

\*igor.soloviev@gmail.com, §alp@ipmras.ru

В работе представлено исследование баллистического детектора в присутствии тепловых флуктуаций. Показана важность учета релятивистского аспекта как при расчете динамики взаимодействия флаксона с токовой неоднородностью, так и при анализе влияния флуктуаций на эту динамику. На основе рассчитанного отклика детектора и стандартного отклонения его величины для различных значений таких параметров, как длина линий, ток питания и демпфирование, проведена оптимизация схемы по величине отношения сигнала к шуму.

## Введение

Для измерений квантовых состояний искусственно-джозефсоновского атома (твердотельного кубита) некоторое время назад был предложен и экспериментально исследован баллистический детектор [1, 2]. Схема детектора схожа с оптическим интерферометром, одно плечо которого слабо взаимодействует с квантовой системой. В данном случае «плечами» являются две джозефсоновские передающие линии (ДПЛ), по каждой из которых распространяется флаксон. Взаимодействие с квантовой системой приводит к ускорению или замедлению флаксона в одной из ДПЛ. Таким образом, информация о состоянии квантовой системы переводится во временную задержку между выходами флаксонов из ДПЛ детектора, которая затем считывается.

Одним из основных вопросов конструкции детектора является оптимизация взаимодействия квантовой системы с флаксоном. Наше теоретическое исследование нелинейной динамики взаимодействия флаксона с токовой неоднородностью, создаваемой магнитным полем, наводимым в ДПЛ квантовой системой, показало важность учета релятивистского аспекта динамики флаксона и позволило оптимизировать параметры детектора по величине отношения сигнала к шуму.

## Моделирование работы детектора

Мы рассматривали непрерывную ДПЛ в рамках уравнения синус-Гордона:

$$\varphi_{tt} - \varphi_{xx} + \sin(\varphi) = i + i_F(x, t) + i_\mu(x) - \alpha\varphi_t, \quad (\text{ф1})$$

где  $\varphi$  – джозефсоновская фаза, индексы  $t$  и  $x$  означают дифференцирование по времени и координате. Координата и время нормированы на джозефсоновскую глубину проникновения  $\lambda_J$  и обратную плазменную частоту  $\omega_p^{-1}$ , соответственно,  $\alpha = \omega_p/\omega_c$  – демпфирование,  $\omega_p = \sqrt{2eI_C/\hbar C}$ ,  $\omega_c = 2eI_C R_N/\hbar$ ,  $I_C$  – критический ток,  $C$  – емкость,  $R_N$  – нормальное сопротивление ДПЛ,  $i$  – ток питания, нормированный на плотность критического тока  $J_C$ ,  $i_F(x, t)$  – флуктуационная плотность тока, зависящая от времени и координаты (шум дельта-коррелированный с безразмерной плотностью  $\gamma = 2ekT/(\hbar J_C \lambda_J)$ ,  $e$  – заряд электрона,  $k$  – константа Больцмана,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $T$  – температура).

В рассматриваемой схеме детектора квантовая система магнитным образом связана со сверхпроводящим кольцом, часть которого гальванически связана с одной из ДПЛ детектора. Магнитный поток, соответствующий определенному состоянию квантовой системы, возбуждает круговой ток в сверхпроводящем кольце, который, в свою очередь, создает токовый диполь – неоднородность тока питания  $i_\mu(x)$  – в ДПЛ с максимумами на границе соединения ДПЛ с кольцом.

В проведенных расчетах мы зафиксировали амплитуду и ширину токового диполя и поместили его в центр одной из ДПЛ детектора, после чего рассчи-

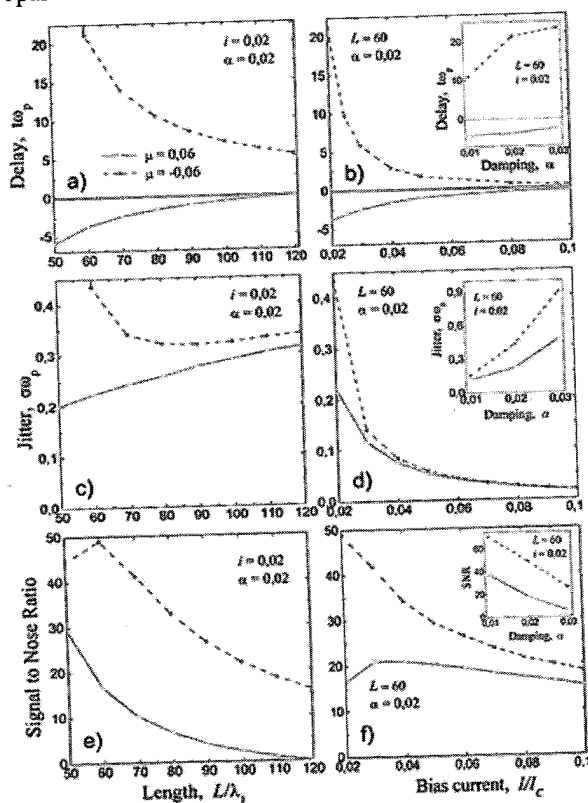
... флаксонов на выходе детектора в области диполя с пониженной плотностью тока питания, ее стандартное отклонение (джиттер) (усреднение данных 10000 реализаций) и отношение сигнала к шуму (отношение сигнала к шуму) в зависимости от длины диполя, тока питания и демпфирования области диполя ДПЛ (см. рисунок 1). Стартовая скорость флаксонов равнялась нулю.

Вследствие релятивистской зависимости эффективной массы флаксона от скорости замедление флаксона в области диполя с пониженной плотностью тока питания оказывается более эффективным, чем обратное ускорение в области с повышенной плотностью тока питания. Ввиду этого взаимодействие с диполем «отрицательной» полярности (см. подпись к рисунку 1) приводит к большей задержке, чем взаимодействие с диполем «положительной» полярности (см. рисунок 1a,b). Уменьшение тока питания  $i$  приводит к увеличению влияния токовой неоднородности  $i_{\mu}(x)$ , см. рисунок 1b. Поскольку, стартуя с нулевой начальной скоростью, флаксон разгоняется, стремясь выйти на стационарную скорость движения, определяемую током питания и демпфированием ДПЛ, увеличение длины ДПЛ с соответствующим смещением области токовой неоднородности от начала ДПЛ приводит к уменьшению отклика, см. рисунок 1a. Увеличение демпфирования приводит к уменьшению скорости флаксонов и соответствующему увеличению абсолютного значения задержки (вставка рисунка 1b).

Зависимости джиттера от рассматриваемых параметров хорошо соответствуют результатам, полученным в работах [3, 4]. Увеличение тока питания и/или уменьшение демпфирования приводит к увеличению стационарной скорости движения флаксонов в ДПЛ, сопровождающемуся увеличением эффективной массы флаксонов, что приводит к уменьшению влияния флуктуаций на их динамику (см. рисунок 1d). С увеличением длины ДПЛ суммарный джиттер увеличивается (рисунок 1c). Минимум на верхней кривой рисунка 1c соответствует увеличению скорости флаксона перед входом в область с пониженной плотностью тока питания, что приводит к увеличению минимальной скорости его движения.

Как следует из рисунков 1d,e, отношение сигнала к шуму в основном определяется откликом и однозначно ухудшается с увеличением демпфирования.

Работа проводилась при поддержке фонда «Династия», гранта Президента РФ № МК-1841.2014.2 и гранта РФФИ 14-02-31002-мол-а.



**Рисунок 1.** Взаимная задержка флаксонов в детекторе с длиной ДПЛ (a), тока питания (b) и демпфирования (вставка на (b)), стандартное отклонение этой задержки (джиттер) от тех же параметров (c), (d), их отношение – отношение сигнала к шуму – для тех же параметров (e), (f). Параметры схемы ( $L$  – длина ДПЛ,  $\mu$  – амплитуда токового диполя флаксона с токовым диполем «положительной» полярности (область с повышенной плотностью тока питания) предшествует области с пониженной плотностью по ходу распространения флаксона) показаны сплошными линиями, кривые для случая взаимодействия с диполем «отрицательной» полярности (обратный порядок расположения соответствующих областей) показаны штриховой линией. Ширина токового диполя  $w_d = 20$ , интенсивность  $\gamma = 10^{-5}$ .

## Литература

1. D.V. Averin, K. Rabenstein, V.K. Semenov // Physical Review B, V. 73, 094504 (2006).
2. A. Fedorov, A. Shnirman, G. Schon et al. // Physical Review B, V. 75, 224504 (2007).
3. A.L. Pankratov, A.V. Gordeeva, L.S. Kuznetsov // Physical Review Letters, V. 109, 087003 (2012).
4. I.I. Soloviev, N.V. Klenov, A.L. Pankratov et al. // Physical Review E, V. 87, 060901(R) (2013).