

Влияние диссипации на состояния электронов в системе сверхпроводящих квантовых точек (Сергей Аксенов)

Предлагается изучить влияние внешней среды на систему из нескольких сверхпроводящих квантовых точек. В наиболее широком смысле данная проблема относится к области создания квантового компьютера. Известно, что базовым элементом квантовой информации является, двухуровневая система, кубит. Его состояние при квантовомеханическом описании задается волновой функцией, которая, в свою очередь, представляет собой суперпозицию двух базисных состояний системы. Принцип суперпозиции позволяет работать со всеми возможными состояниями системы одновременно, а не с одним в случае классических вычислений. Это свойство – одна из причин, почему квантовые компьютеры имеют преимущества над классическими при решении ряда задач. Чтобы суперпозиция была возможна, необходима квантовомеханическая когерентность (корреляция фаз между разными базисными состояниями системы) и ее сохранение при реализации алгоритмов работы с кубитом и массивами кубитов.

Когерентность может нарушаться из-за тепловых флуктуаций, взаимодействия системы с внешними полями и/или (квази)частицами, т.е. за счет влияния на кубит внешней среды. Увеличение времени, на котором фазы базисных состояний кубита остаются скоррелированными (время декогеренции), является одной из основных проблем создания квантового компьютера. В этом отношении майорановская квазичастица как основа кубита обладает преимуществом. Это возбуждение теоретически предсказано в одномерной сверхпроводящей системе (квантовой проволоке). Оно является делокализованным, т.е. его волновая функция имеет максимумы на противоположных концах проволоки и экспоненциально затухает вглубь. Следовательно, чтобы потерять информацию, которая хранится в кубите майорановского типа, нужно одновременно воздействовать на оба конца структуры.

Одна из систем, где на практике ведется поиск майорановских квазичастиц – гибридные проволоки с полупроводниковой сердцевинкой и сверхпроводящей оболочкой, помещенные во внешнее магнитное поле. Однако, несмотря на активные усилия на протяжении последних 10+ лет, однозначные доказательства существования этих специфических состояний до сих пор отсутствуют. Имеющиеся проблемы с интерпретацией и воспроизводимостью экспериментальных данных по туннельной спектроскопии обусловлены несколькими причинами. Во-первых, наблюдаемые особенности вольт-амперных характеристик (ВАХ) могут быть вызваны не только присутствием майорановских состояний. Во-вторых, синтезируемые образцы все еще достаточно грязные. Другими словами, на практике трудно контролировать взаимодействия между электронами на масштабах межатомных расстояний и реализовать пространственно однородную систему, которая рассматривается в теории [1].

Имея ввиду упомянутые проблемы, в последние несколько лет фокус внимания экспериментальных групп стал смещаться в сторону систем сверхпроводящих квантовых точек. Отдельная точка - это нульмерный квантовый объект (в отличие от одномерных проволок), что является следствием ограничения движения электронов во всех трех измерениях за счет приложения электрических полей затворных электродов (гейтов).

Физика квантовых точек развивается уже более 40 лет. Если имеется массив из нескольких таких объектов, то взаимодействие между ними определяется высотой (прозрачностью) потенциального барьера, через который туннелируют электроны, находящиеся на уровнях точек. Прозрачностью же можно управлять, меняя напряжение на дополнительных гейтах, расположенных в области между соседними точками. По тому же принципу можно управлять положением энергетических уровней электронов в точках, а также высотой туннельных барьеров между точками и контактами (последние подсоединяются для измерения ВАХ). На сегодняшний день, достигнут высокий уровень контроля энергетических параметров в массивах точек, связанных с контактами.

В экспериментах последних лет [2,3] были синтезированы системы из двух и трех сверхпроводящих квантовых точек. При этом сверхпроводящие свойства у электронов, находящихся на соседних точках (тенденция к образованию пары, несмотря на кулоновское отталкивание электронов), индуцируются помещением островков сверхпроводящего материала между точками. Было показано, что наблюдаемые особенности ВАХ согласуются с теоретически предсказанным за счет майорановского состояния [4].

Контакты, резервуары электронов, являются одним из примеров воздействия внешней среды на квантовый объект. В недавней работе [5] было проанализировано влияние двух несверхпроводящих контактов на спектр пары сверхпроводящих квантовых точек. На математическом языке такое воздействие приводит к тому, что матрица оператора полной энергии точек, гамильтониана, становится неэрмитовой. Это имеет ряд интересных следствий, отсутствующих в случае эрмитовых матриц, например, образование особых точек в спектре, слияние собственных векторов и их неортогональность.

Рассмотренная в статье [5] модель открытой системы двух сверхпроводящих точек является одной из наиболее простых. Авторами предполагалось, что отдельный контакт влияет только на одну из точек. Более общее описание, которое планируется развить на школе, предполагает взаимодействие резервуара частиц со всей системой, а также поправки от такого взаимодействия не только к энергиям уровней точек (как в работе [5]), но и интенсивностям туннелирования между точками, а также к интенсивностям сверхпроводящего спаривания. Особый интерес представляет изучение параметрических областей реализации майорановских состояний и времени их жизни.

1. С.В. Аксенов, [Письма в ЖЭТФ, 120\(1\), 51-61 \(2024\)](#).
2. T. Dvir, G. Wang, N. van Loo, et al., Nature 614, 445 (2023), [arXiv:2206.08045](#).
3. A. Bordin, F. J. Bennebroek Evertsz', B. Roovers, et al., [arXiv:2504.13702](#).
4. M. Leijnse, K. Flensberg, Phys. Rev. B 86, 134528 (2012), [arXiv:1207.4299](#).
5. J. Cayao, R. Aguado, Phys. Rev. B 111, 205432 (2025), [arXiv:2406.18974](#).