

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ФАЗЫ С МНОЖЕСТВОМ МАЙОРАНОВСКИХ МОД В СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ НАНОПРОВОЛОКЕ ПРИ УЧЕТЕ ДАЛЬНИХ ПЕРЕСКОКОВ И СПАРИВАНИЙ

А. Гамов¹

Научный руководитель А.О. Злотников²
кандидат физико-математических наук

¹Сибирский федеральный университет
²Институт физики им. Л.В. Киренского,
ФИЦ КНЦ СО РАН

В последнее время представляет интерес описание топологических фаз с множеством краевых майорановских мод, которые могут формироваться в сверхпроводящих нанопроволоках при учете взаимодействий [1, 2], цепочках с магнитными атомами [3] и под действием управляющих внешних полей периодических во времени [4].

В данной работе для модели полупроводниковой нанопроволоки с наведенной сверхпроводимостью и спин-орбитальной связью, помещенной в магнитное поле, определены топологические фазовые диаграммы при учете перескоков, в том числе с переворотом спина, и спариваний в первой и второй координационных сферах (КФ). Показано, что учет процессов во второй КФ приводит к возникновению новых нетривиальных фаз со значением топологического индекса $N_{BDI} = 3$ и $N_{BDI} = 4$ (см. рисунок 1 А)). Считается, что все параметры в пределах одной КФ равны и обозначаются λ_i , где i – номер КФ. Зависимость топологического индекса от отношения λ_2/λ_1 приведено на рисунке 1 Б). Видно, что с ростом этого отношения реализуется серия квантовых топологических переходов. Проверено, что в нанопроволоке с открытыми граничными условиями число пар краевых майорановских мод соответствует значению N_{BDI} .

Доказано, что различные фазы на топологической фазовой диаграмме могут быть также характеризованы числом заполненных, обладающих отрицательной энергией однофермионных состояний (см. [5], [6]) в особых точках зоны Бриллюэна при учете дальних перескоков и спариваний. В данных точках либо сверхпроводящий параметр порядка, либо интеграл спин-орбитальной связи, зависящие от квазиимпульса, обращаются в нуль. Соответственно, на границах между различными фазами часть энергий однофермионных состояний меняет знак, проходя через 0. Показано, что фермионная четность (ФЧ) основного состояния замкнутой нанопроволоки в топологических фазах определяется четностью числа заполненных однофермионных состояний. Таким образом, при переходах со сменой ФЧ зануляется нечетное число энергий однофермионных состояний. На рисунке 1

А) желтым цветом отмечены области с нечетной ФЧ, бирюзовым – области с четной ФЧ.

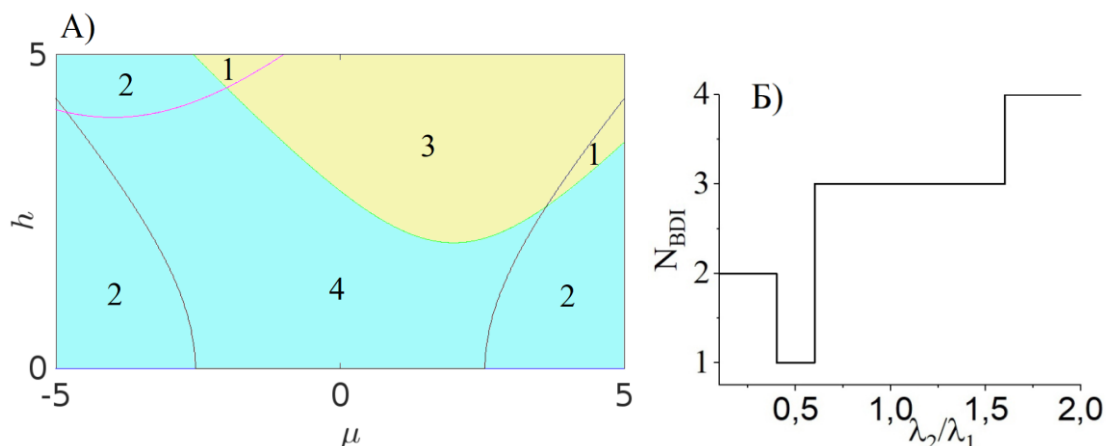


Рисунок 1. А) – Топологическая фазовая диаграмма в переменных химпотенциал μ – зеемановское расщепление h для амплитуды $\lambda_2=2$ (все в единицах λ_1); Б) – серия топологических переходов с изменением индекса N_{BDI} при увеличении отношения λ_2/λ_1 для $h = 1.5, \mu = 0$

Исследование выполнено при финансовой поддержке фонда развития теоретической физики и математики «Базис».

Список литературы

1. Niu Y., Chung S. B., Hsu C. - H., Mandal I., Raghu S., Chakravarty S. Majorana zero modes in a quantum Ising chain with longer ranged interactions // Phys. Rev. 2012. Vol. 85. P. 035110.
2. Aksenov S. V., Zlotnikov A. O., Shustin M. S. Strong Coulomb interactions in the problem of Majorana modes in a wire of the nontrivial topological class BDI // Phys. Rev. 2020. Vol. 101. P. 125431.
3. Bepalov A. A. Tuning the Topological state of a helical atom chain via a Josephson phase // Phys. Rev. 2022. Vol. 106. P. 134503.
4. Wu H., Wu S., Zhou L. Floquet Topological Superconductors with Many Majorana Edge Modes: Topological Invariants, Entanglement Spectrum and Bulk-Edge Correspondence [Электронные ресурсы] // arXiv.org. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2303.04674> (дата обращения: 16.03.2023)
5. Вальков В. В., Мицкан В. А., Шустин М. С. Фермионная четность основного состояния и калорические свойства сверхпроводящей нанопроволоки // ЖЭТФ. 2019. Т. 156. №. 3(9). С. 507 – 520.
6. Вальков В. В., Шустин М. С., Аксенов С. В., Злотников А. О., Федосеев А. Д., Мицкан В. А., Каган М. Ю. Топологическая сверхпроводимость и майорановские состояния в низкоразмерных системах // УФН. 2022. Т. 192. №. 1. С. 3 – 44.