

Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального
государственного бюджетного научного учреждения “Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской
академии наук”

На правах рукописи

Копасов Александр Андреевич

МЕЗОСКОПИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ВИХРЕВОЙ ФАЗЕ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ И
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

01.04.07 — физика конденсированного состояния

Научный доклад по научно-квалификационной работе (диссертации)

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., зав. лаб. 122 ИФМ РАН

Мельников Александр Сергеевич

Рецензент:

к.ф.-м.н., с.н.с. отдела 120 ИФМ РАН

Шаров Сергей Вячеславович

Нижний Новгород

2019

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Изучение особенностей вихревого состояния в неупорядоченных и наноструктурированных сверхпроводниках в настоящее время представляет интерес для большого числа экспериментальных и теоретических групп в области физики конденсированного состояния. Интерес этот обусловлен целым рядом причин.

Наличие беспорядка влияет на структуру вихревого состояния в реальных образцах и, таким образом, изучение влияния беспорядка на вихревые состояния и фазовые диаграммы магнитное поле H - температура T неупорядоченных сверхпроводников имеет первостепенное значение для всех возможных применений данных материалов. Сверхпроводящие свойства и фазовые диаграммы многих сверхпроводящих сплавов хорошо описываются в рамках квазиклассической теории Узаделя [1; 2] (сплошная кривая на Рис. 1). Типичная температурная зависимость $H_{c2}(T)$ имеет отрицательную кривизну и выходит на насыщение при низких температурах. Однако, для достаточно большого класса сверхпроводников таких, как высокотемпературные сверхпроводники, композитные пленки In/InO_x , MgB_2 , железосодержащие сверхпроводники [3–12], согласие между теорией и экспериментом нарушается: кривизна $H_{c2}(T)$ может менять знак, и насыщение при низких температурах может вовсе отсутствовать (см. штриховую и штрих-пунктирные линии на Рис. 1). Такими нетривиальными фазовыми диаграммами магнитное поле - температура могут обладать как многозонные сверхпроводники, так и сверхпроводники с необычным типом спаривания [13–15]. Необычные линии фазового перехода могут также объясняться влиянием беспорядка [16–27]. В частности, в присутствии сильного беспорядка необычные линии фазового перехода могут иметь место при приближении системы к переходу металл-изолятор (см. [16; 17]). В качестве другой возможной причины реализации необычных фазовых диаграмм могут выступать мезоскопические флуктуации, т. е. отклонения от описания, основанного на усредненных по ансамблю функциях Грина [26]. Получающиеся поправки оказываются малы в меру фактора $(k_F \ell)^{-1}$, где $\hbar k_F$ - импульс Ферми, ℓ - длина свободного пробега. Еще одной возможной причиной реализации необычных зависимостей $H_{c2}(T)$ является модуляция характеристик беспорядка, связанная, например, с неоднородностью в распределении примесей. Влияние такого модулированного беспорядка может быть проанализировано в рамках квазиклассиче-

ской теории Узалея с неоднородным коэффициентом диффузии $D(\mathbf{r})$. Отметим, что модулированный беспорядок и соответствующие ему необычные фазовые диаграммы магнитное поле - температура естественным образом возникают при изучении фазовых диаграмм сверхпроводящих сверхрешеток таких, как Nb/Al₂O₃, Nb/Cu, V/Cu, Nb/Pd, Nb/Ti, Nb/NbTi и Nb/NbZr [28—35]. Экспериментально наблюдаемые фазовые диаграммы таких сверхструктур хорошо описываются в рамках одномерного профиля коэффициента диффузии $D(x)$, где x - координата, перпендикулярная плоскостям слоев [19—22; 28—35]. Влияние модулированного

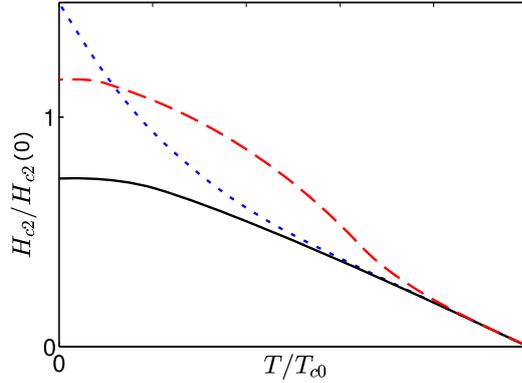


Рис. 1. Типичные зависимости $H_{c2}(T)$ для “грязных” сверхпроводников, где $H_{c2}(0) = H_{c2}(T = 0)$. Сплошная линия соответствует теории Вертхамера - Гельфанда - Хоенберга, а штриховая и штрихпунктирная линии качественно описывают зависимости $H_{c2}(T)$, наблюдаемые в работах [3—12].

беспорядка на магнитотранспортные свойства неупорядоченных сверхпроводников должно быть более ярко выражено при сильных магнитных полях и низких температурах, так как при увеличении магнитного поля пространственный масштаб сверхпроводящих зародышей $\ell_H \propto 1/\sqrt{H}$ уменьшается и может стать сравнимым с характерным масштабом пространственной модуляции коэффициента диффузии ℓ_c . Таким образом, при сильных магнитных полях энергетически более выгодным оказывается зарождение сверхпроводимости вблизи локальных минимумов длины когерентности $\xi \propto \sqrt{D}$. Вблизи критической температуры в нулевом магнитном поле становится справедливым условие $\ell_H \gg \ell_c$, что означает эффективное усреднение модуляций беспорядка. Появление сверхпроводящих островков в сильных магнитных полях должно приводить к уширению сверхпроводящего перехода на зависимостях сопротивления от температуры при заданном магнитном поле. Начало уменьшения сопротивления с уменьшением температуры фактически соответствует сверхпроводящему состоянию в форме островков в то время, как полное отсутствие сопротивления соответствует беспрепятственному протеканию сверхпроводящего тока [23]. Таким образом, ширина сверхпроводящего перехода на температурной зависимости сопротивления должна увеличиваться при увеличении магнитного поля. Этот эффект оказывается важным, так как он позволяет отделить вклад модулированного беспорядка в форму линии $H_{c2}(T)$ от внутренних механизмов таких, например, как необычный тип сверхпроводящего спаривания и многолиственность Ферми поверхности.

В свою очередь, изучение особенностей вихревого состояния в наноструктурированных

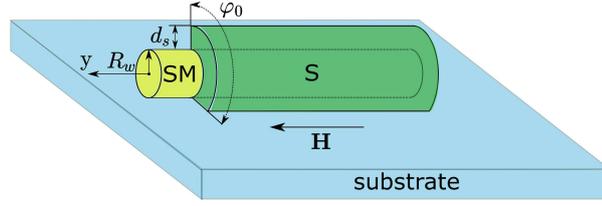


Рис. 2. Схематичное изображение полупроводникового провода (желтый) покрытого сверхпроводящей оболочкой (зеленый) на подложке (светло-синий). R_w , d_s и φ_0 - радиус провода, толщина оболочки и азимутальный угол соответственно. Внешнее магнитное поле H направлено вдоль оси провода Oy , а вектор спин-орбитального взаимодействия Рашбы направлен перпендикулярно подложке.

сверхпроводниках, а именно в полупроводниковых проводах, покрытых сверхпроводящей оболочкой, в настоящее время представляет интерес в связи с перспективой использования таких гибридных структур для реализации майорановских состояний и последующего устройства топологически защищенных квантовых вычислений на основе майорановских состояний [36—44] (см., например, Рис. 2). Ключевая идея основана на наблюдении, что в достаточно сильных магнитных полях H наведенные сверхпроводящие корреляции обладают так называемой p -волновой симметрией, реализуя тем самым модель цепочки Китаева [36]. На краях таких проводов могут быть локализованы подщелевые квазичастичные состояния, которые рассматриваются как реализация майорановских частиц в твердотельных системах [45—50]. Одной из экспериментальных сложностей реализации майорановских состояний в рамках первоначального предложения [38; 39] является достаточно большое значение приложенного магнитного поля (~ 1 Т), которое, вообще говоря, может быть сравнимо с критическим магнитным полем разрушения сверхпроводимости в оболочке. Ряд недавних теоретических работ [51; 52] ставит своей целью снятие данного ограничения. В частности, в работе [51] было показано, что в полностью покрытых полупроводниковых нанопроводах, находящихся во внешнем магнитном поле H , направленном вдоль оси провода, входящие при слабых магнитных полях ($H \sim 0.1$ Т) вихри могут перевести систему в топологическую фазу даже без большого значения зеемановской энергии. Основным требованием реализации топологической фазы в полностью покрытых полупроводниковых проводах является наличие в полупроводниковом коре достаточно сильного спин-орбитального взаимодействия Рашбы с *радиальным вектором нормали*. Основная идея вышеуказанной работы состоит в замене зеемановской энергии энергетическим масштабом $\delta\varepsilon_N \sim \hbar^2/m^*R^2$ - характерным межуровневым расстоянием для электронов с эффективной массой m^* в полупроводниковом проводе радиуса R . Однако, в работе [52] показано, что диапазон материальных параметров (радиус полупроводникового кора и уровень химического потенциала в нем), соответствующий топологической фазе оказывается очень узким, а также характерная энергия спин-орбитального взаимодействия оказывается недостаточной для того, чтобы обеспечить топологический фазовый переход в реальных структурах. Данное заключение основано на предположении, что радиус кора R достаточно мал, и поперечные моды формируются только за счет нормального отражения электронов и дырок от границы образца. Данное предположение становится

неочевидным, если вспомнить, что сверхпроводящая щель в полупроводниковом проводе наводится посредством андреевского отражения от границы кора со сверхпроводящей оболочкой. Таким образом, естественно ожидать, что структура поперечных мод в такой гибридной структуре будет определяться как нормальным, так и андреевским отражением. Соответственно, характерное межуровневое расстояние будет определяться не только параметром $\delta\varepsilon_N$, но и характерным энергетическим масштабом, возникающим из-за андреевского отражения - минищелью спектра Кароли - де Жена - Матрикона (КдЖМ): $\delta\varepsilon_s \sim \Delta/k_\perp R_c$, где $R_c = \max[R, \xi]$ - радиус нормального кора вихря, ξ - сверхпроводящая длина когерентности, $k_\perp = \sqrt{k_F^2 - k_z^2}$ - проекция импульса на поперечное сечение провода, k_F - импульс Ферми, и Δ - сверхпроводящая щель в оболочке. Величина минищели определяется так называемым квазиклассическим параметром $k_F\xi$: для типичных объемных s -волновых сверхпроводников $k_F\xi \gg 1$, и минищель чрезвычайно мала в то время, как в полупроводниковом проводе с наведенной сверхпроводимостью может реализовываться экзотический квантовый предел $k_F\xi \sim 1$ и $\delta\varepsilon_s \sim \Delta$. В этом случае, минищель в квазичастичном спектре гибридной структуры уже не будет зависеть от величины спин-орбитального взаимодействия и может выступать в роли жесткой щели, обеспечивающей топологическую защиту для майорановских состояний при условии, что они сохраняются в пределе доминирующего андреевского отражения. С другой стороны наличие существенной доли нормального отражения на границе полупроводник / сверхпроводник из-за скачка материальных параметров (эффективных масс, энергий Ферми) и на границе образца может привести к появлению мезоскопических осцилляций уровней КдЖМ и, таким образом, к отсутствию щели в спектре возбуждений такого наноструктурированного сверхпроводника. В связи с вышеизложенным представляет интерес непосредственный расчет модовой структуры в нанопроводах с учетом как нормального, так и андреевского отражения, а также исследование зависимостей положения подщелевых уровней от приложенного магнитного потока.

Необходимо также отметить, что теоретическое описание электронных свойств вихревого состояния в полупроводниковых нанопроводах, покрытых сверхпроводящей оболочкой, должно быть построено самосогласованно с учетом решения уравнения на сверхпроводящий параметр порядка в оболочке. В большинстве случаев теоретическое описание наведенных сверхпроводящих корреляций проводится в рамках упрощенной модели, основанной на введении фенологического параметра наведенной щели в проводе [38; 39], находящегося в контакте с обычным s -волновым сверхпроводником. Данная упрощенная модель, хоть и полезная в большинстве случаев для качественного описания эффекта близости, имеет важные недостатки, избавиться от которых можно только с помощью использования микроскопической теории эффекта близости [53—58], основанной на решении уравнений Горькова на функции Грина. Вышеуказанный подход позволяет получить выражение для оператора наведенной щели, фигурирующего в феноменологической модели. Более того, в рамках микроскопической теории можно получить зависимость наведенной щели от прозрачности границы между проводом и s -волновым сверхпроводником и уровня химического потенциала в проводе через плотность состояний. Еще одним важным обстоятельством является то, что обмен

электронами между полупроводниковым проводом и металлической оболочкой может привести к обратному эффекту близости, а именно, к подавлению сверхпроводящего параметра порядка на границе с проводом. В случае достаточно тонкой сверхпроводящей оболочки такое подавление может привести к изменению сверхпроводящей критической температуры всей системы. Изучение влияния обратного эффекта близости необходимо для установления оптимального диапазона параметров, позволяющего организовать переключения между топологически тривиальными и нетривиальными режимами, используемые в существующих протоколах брейдинга. Исследование обратного эффекта близости в полупроводниковых проводах, частично покрытых сверхпроводящей оболочкой, должно проводиться в рамках самосогласованных решений уравнений Горькова на функции Грина, в которых учитываются обе частоты туннелирования, описывающие переходы квазичастиц из сверхпроводящей пленки в провод [53]. Первая характерная частота γ_s характеризует утечку электронов из провода в сверхпроводник и, таким образом, определяет уширение уровней в проводе. Вторая частота γ_w описывает обратный процесс. Частоты туннелирования определяются как вероятностью туннелирования через барьер на границе полупроводник/сверхпроводник, так и соответствующими плотностями состояний. В частности, оказывается важным, что частота γ_w , будучи пропорциональной плотности состояний в полупроводниковом проводе, имеет нетривиальную зависимость от энергии. Действительно, в случае одномерного провода плотность состояний расходуется как квадратный корень из энергии, отсчитанной от дна зоны проводимости. Эта особенность Ван Хофа в плотности состояний провода должна приводить к сильной зависимости частоты туннелирования γ_w от энергии, и, как следствие, сверхпроводящая критическая температура должна зависеть от положения уровня Ферми, отсчитанного от дна зоны проводимости в проводе.

Цели исследования

Целью данной работы является теоретическое исследование мезоскопических эффектов в вихревой фазе неупорядоченных сверхпроводников и в гибридных системах, состоящих из полупроводниковых нанопроводов, полностью или частично покрытых s -волновой сверхпроводящей оболочкой.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные задачи:

- 1) Исследование влияния модулированного беспорядка, а именно неоднородного распределения коэффициента диффузии, на температурные зависимости верхнего критического магнитного поля неупорядоченных сверхпроводников.
- 2) Изучение влияния неоднородного распределения параметра порядка в форме локализованных сверхпроводящих островков на зависимость сопротивления от температуры и магнитного поля вблизи начала (онсета) сверхпроводящего перехода.

- 3) Исследование обратного эффекта близости в полупроводниковых нанопроводах с большим g -фактором и сильным спин-орбитальным взаимодействием, частично покрытых s -волновой сверхпроводящей оболочкой.
- 4) Расчет электронной структуры вихревого состояния в полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых s -волновой сверхпроводящей оболочкой во внешнем магнитном поле, направленном вдоль оси провода.
- 5) Теоретическое объяснение экспериментально наблюдаемых зависимостей щели в спектре возбуждений полупроводниковых нанопроводов, полностью покрытых s -волновой сверхпроводящей оболочкой, в зависимости от приложенного магнитного поля, направленного вдоль оси провода.

Научная новизна работы

Научная новизна заключается в следующем:

- На основе квазиклассической теории Узаделя, обобщенной на случай *неоднородного* распределения коэффициента диффузии рассчитаны температурные зависимости верхнего критического магнитного поля для “грязных” сверхпроводников с некоторыми заданными пространственными профилями коэффициента диффузии. В рамках теории возмущений по флуктуациям коэффициента диффузии рассчитаны температурные зависимости дисперсии верхнего критического поля в сверхпроводниках со случайным распределением коэффициента диффузии, имеющим *конечный* корреляционный масштаб.
- На основе нестационарной теории Гинзбурга - Ландау получена оценка температурной зависимости сопротивления при заданном магнитном поле в случае неоднородного распределения параметра порядка в форме локализованных сверхпроводящих островков.
- В рамках *самосогласованного* решения уравнений Горькова на функции Грина и уравнения самосогласования на сверхпроводящий параметр порядка вычислена зависимость критической температуры сверхпроводящего перехода полупроводниковых нанопроводов, частично покрытых s - волновой сверхпроводящей оболочкой, в зависимости от параметров нанопровода - уровня химического потенциала в проводе, отсчитанного от дна зоны проводимости, от величины зеемановского расщепления и энергии спин-орбитального взаимодействия.
- Показано, что особенности профиля электростатического потенциала в полупроводниковом нанопроводе, полностью покрытом сверхпроводящей оболочкой, могут определять поведение жесткой щели в спектре возбуждений данной гибридной системы в зависимости от приложенного магнитного поля, направленного вдоль оси нанопровода.

Теоретическая и практическая значимость работы

С практической точки зрения, интерес представляет объяснение необычных фазовых диаграмм магнитное поле - температура, экспериментально наблюдаемых в широком классе неупорядоченных сверхпроводящих соединений, а также реализация майорановских состояний в полупроводниковых нанопроводах, полностью или частично покрытых оболочкой из s -волнового сверхпроводника. В связи с этим

- Результаты расчета фазовых диаграмм магнитное поле - температура для неупорядоченных сверхпроводников с неоднородным пространственным распределением коэффициента диффузии применимы для анализа экспериментально наблюдаемых фазовых диаграмм широкого класса неупорядоченных сверхпроводящих соединений.
- Полученная оценка зависимости сопротивления от температуры и магнитного поля для образцов с неоднородным распределением параметра порядка в форме локализованных сверхпроводящих островков позволяет предложить способ по выделению вклада модулированного беспорядка в форму линии фазового перехода неупорядоченных сверхпроводников от других механизмов таких, например, как необычный тип сверхпроводящего спаривания и многолистность Ферми поверхности.
- Анализ обратного эффекта близости в полупроводниковых нанопроводах, частично покрытых сверхпроводящей оболочкой, необходим для установления оптимального диапазона параметров, необходимого как для реализации топологически защищенных майорановских состояний, так и для последующей организации переключений между топологически тривиальными и нетривиальными свойствами данной системы, используемых в существующих протоколах брейдинга.
- Расчеты электронной структуры вихревого состояния в полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой, позволяют объяснить экспериментально наблюдаемые зависимости дифференциальной проводимости гибридных нанопроводов в зависимости от приложенного магнитного поля, направленного вдоль оси провода.

Методология и методы исследования

В ходе выполнения работы использовались стандартные теоретические подходы, позволяющие описать спектральные свойства сверхпроводящих гибридных структур:

- Формализм квазиклассических уравнений Узаделя для описания линии фазового перехода в неупорядоченных сверхпроводниках.
- Микроскопический подход на основе метода туннельного гамильтониана для исследования эффекта близости в сверхпроводящих гибридных структурах.

- Теория Боголюбова - де Жена для вычисления волновых функций, спектра и плотности состояний квазичастиц в сверхпроводящих гибридных структурах.
- Численные методы нахождения собственных значений и собственных функций гамильтониана задачи посредством диагонализации его матрицы.

Положения, выносимые на защиту

- 1) Наличие модуляций характеристик беспорядка в неупорядоченных сверхпроводниках может приводить к появлению сегментов с положительной кривизной на температурной зависимости верхнего критического магнитного поля, определенной по началу (онсету) сверхпроводящего перехода.
- 2) Наличие большого g -фактора а также особенностей Ван Хофа в электронной плотности состояний в полупроводниковом проводе, покрытом s -волновой сверхпроводящей оболочкой, может приводить к подавлению сверхпроводящих корреляций в оболочке в области слабых магнитных полей и к возвратной сверхпроводимости в области сильных магнитных полей в топологически нетривиальной фазе.
- 3) Наличие обедненной области в центре полупроводникового кора в полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой во внешнем магнитном поле, направленном вдоль оси провода, может приводить к нетривиальной зависимости щели в спектре возбуждений данной гибридной структуры от магнитного поля, проявляющейся в закрытии щели при входе вихря и последующем ее переоткрытии при увеличении магнитного поля.

Степень достоверности и апробации результатов

Диссертация выполнена в Институте физики микроструктур РАН - филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения “Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук” в период с 2015 по 2019 год. Результаты работы обсуждались на семинарах в ИФМ РАН. Основные результаты диссертации были представлены на XX-XXIII международных симпозиумах “Нанопизика и наноэлектроника” (Нижний Новгород - 2016-2019 гг.); школах-конференциях “Проблемы и методы физики твердого тела и высоких давлений” (Сочи - 2015 г., 2017 г.); “Winter school on Quantum condensed-matter physics” (Черноголовка - 2017 г.); “International Focus Workshop - New Platforms for Topological Superconductivity with Magnetic Atoms” (Dresden, Germany - 2018 г.); Basis Foundation Summer School “Many body theory meets quantum information” (Солнечногорск - 2018 г.).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах, из них 3 статьи в рецензируемых журналах [А1—А3] и 6 тезисов докладов [А4—А9].

Объем и структура диссертации

Данная диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и трех приложений.

Содержание работы

Работа содержит введение, основную часть, заключение, список цитируемой литературы и три приложения. В свою очередь основная часть делится на три главы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию влияния модулированного беспорядка на линии фазового перехода неупорядоченных сверхпроводников. На основе теории Узаделя с неоднородным коэффициентом диффузии вычислены зависимости $H_{c2}(T)$ для некоторых заданных пространственных профилей $D(\mathbf{r})$ как в рамках метода пробных функций, так и с помощью прямого численного расчета. Также рассчитана дисперсия верхнего критического магнитного поля для случайных профилей $D(\mathbf{r})$, имеющих заданный масштаб корреляции. В случае дельта-коррелированного профиля $D(\mathbf{r})$ проведена оценка зависимости дисперсии H_{c2} на основе размерного анализа, результаты которого находятся в согласии с прямыми расчетами дисперсии верхнего критического поля. Полученные в результате расчеты указывают на существенное влияние размерности пространственного профиля $D(\mathbf{r})$ на линию фазового перехода: при одних и тех же масштабах неоднородности ℓ_c увеличение размерности приводит к уменьшению верхнего критического поля и ослаблению влияния модулированного беспорядка на фазовую диаграмму. Наконец, в рамках нестационарной теории Гинзбурга - Ландау получена оценка температурной зависимости сопротивления для сверхпроводников с неоднородным распределением параметра порядка в форме локализованных островков сверхпроводящей фазы вблизи онсета сверхпроводящего перехода. Приложение А содержит детали вычислений верхнего критического поля как для заданных, так и для случайных профилей коэффициента диффузии.

Вторая глава посвящена исследованию электронной структуры вихревого состояния в полупроводниковом проводе, полностью покрытом сверхпроводящей оболочкой. На основе уравнений Боголюбова - де Жена найдены зависимости спектра возбуждений полупроводниковых нанопроводов, полностью покрытых s -волновой сверхпроводящей оболочкой от приложенного магнитного поля, направленного вдоль оси провода, и параметров провода при

учете как нормального отражения на границе полупроводник / сверхпроводник из-за скачка материальных параметров и на границе образца, так и андреевского отражения на границе полупроводник / сверхпроводник. На основе данных расчетов вычислены зависимости электронной плотности состояний и ширины щели в спектре возбуждений данной гибридной структуры от приложенного магнитного потока и параметров провода. В работе также показано, что форма профиля электростатического потенциала в коре может существенно влиять на зависимость жесткой щели в спектре возбуждений от магнитного потока: при наличии обедненной области в центре кора возможно нетривиальное поведение жесткой щели, проявляющееся в закрытии щели при входе вихря и последующем ее переоткрытии при увеличении магнитного потока. Приложение Б содержит вывод точных решений уравнений Боголюбова - де Жена для полупроводникового кора а также вывод эффективных граничных условий для учета наличия контакта полупроводникового кора с s -волновой сверхпроводящей оболочкой.

Третья глава посвящена изучению обратного эффекта близости в полупроводниковых проводах, покрытых s -волновой сверхпроводящей оболочкой. На основе решений уравнений Горькова и уравнения самосогласования на сверхпроводящую щель в оболочке, вычислена зависимость сверхпроводящей критической температуры системы в зависимости от параметров провода - уровня химического потенциала, величины зеемановского расщепления и энергии спин-орбитального взаимодействия. Полученные результаты указывают на то, что наличие особенностей Ван Хофа в плотности состояний провода может приводить к подавлению сверхпроводящих корреляций в оболочке. Также оказывается, что в общем случае влияние особенностей Ван Хофа на сверхпроводимость также может сопровождаться усилением парамагнитного эффекта. Действительно, учет частоты туннелирования γ_w приводит к дополнительной эффективной зеемановской энергии в сверхпроводящей оболочке из-за обмена квазичастицами оболочки с проводом. В силу расходимости плотности состояний вместе с большим g - фактором в проводе индуцированная зеемановская энергия вполне может превышать характерное значение зеемановской энергии для изолированной оболочки. Зависимость критической температуры от магнитного поля имеет минимумы при $H \sim |\mu_w|/g\beta$, где μ_w - энергия Ферми, отсчитанная от дна зоны проводимости при $H = 0$ и β - магнетон Бора. Строго говоря, наличие спин-орбитального взаимодействия может привести к появлению третьей особенности Ван Хофа при энергиях ниже $-g\beta H/2$, но данная особенность может наблюдаться только при достаточно сильном спин-орбитальном взаимодействии. Заметим, что в случае исчезающе малой наведенной щели Δ_{ind} вышеуказанное значение магнитного поля разделяет режимы с топологически тривиальными и топологически нетривиальными свойствами системы [38; 39; 54]. При дальнейшем увеличении магнитного поля эффект близости оказывается существенно подавленным, так как в отсутствии спин-орбитального взаимодействия уровень Ферми пересекает одна подзона, полностью поляризованная по спину в направлении магнитного поля. Спин-орбитальное взаимодействие разрушает спиновую поляризацию, смешивая состояния с различной проекцией спина, и, таким образом, обеспечивает ненулевую наведенную сверхпроводящую щель в проводе $\sim \alpha \Delta_{ind}/g\beta H$, где α - постоянная спин-орбитального взаимодействия, Δ_{ind} - наведенная щель в проводе. В третьей

главе показано, что даже в присутствии спин-орбитального взаимодействия увеличение магнитного поля подавляет наведенную сверхпроводимость, восстанавливая значение параметра порядка в сверхпроводящей пленке. Такая возвратная сверхпроводимость, стимулированная магнитным полем, имеет место вплоть до значения верхнего критического поля в сверхпроводящей пленке, определяемого либо орбитальными, либо парамагнитными эффектами. Подавление сверхпроводящего параметра порядка вблизи топологического фазового перехода может приводить к еще более интересному явлению: как и в случае обычного парамагнитного эффекта такое подавление может приводить к переходу в состояние типа Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла с пространственно модулированным сверхпроводящим параметром порядка в оболочке. Приложение В содержит вывод системы уравнений Горькова и численную схему для расчета электронного спектра провода при температурах, меньших критической.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты работы

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

- 1) В рамках квазиклассической теории Узалея с неоднородным распределением коэффициента диффузии показано, что наличие модуляций характеристик беспорядка в неупорядоченных сверхпроводниках может приводить к появлению сегментов с положительной кривизной на температурной зависимости верхнего критического магнитного поля, определенной по началу (онсету) сверхпроводящего перехода.
- 2) В рамках нестационарной теории Гинзбурга - Ландау получена оценка температурной зависимости сопротивления для сверхпроводников с неоднородным распределением параметра порядка в форме локализованных островков сверхпроводящей фазы вблизи начала (онсета) сверхпроводящего перехода.
- 3) В рамках модели туннельного гамильтониана в режиме некогерентного туннелирования показано, что в полупроводниковых нанопроводах, частично покрытых s -волновой сверхпроводящей оболочкой, наличие большого g -фактора для электронов в проводе, а также особенностей Ван Хофа в электронной плотности состояний в проводе могут приводить к подавлению сверхпроводящих корреляций в оболочке в области слабых магнитных полей и к возвратной сверхпроводимости в области сильных магнитных полей в топологически нетривиальной фазе.
- 4) На основе уравнений Боголюбова - де Жена найдены зависимости спектра возбуждений полупроводниковых нанопроводов, полностью покрытых s -волновой сверхпроводящей оболочкой от приложенного магнитного поля, направленного вдоль оси провода, и параметров провода при учете как нормального отражения на границе полупроводник / сверхпроводник из-за скачка материальных параметров (эффективных масс и энергий

Ферми) и на границе образца, так и андреевского отражения на границе полупроводник / сверхпроводник. На основе данных расчетов вычислены зависимости электронной плотности состояний и минищели в спектре возбуждений данной гибридной структуры от приложенного магнитного потока и параметров провода.

Список литературы

1. Helfand E. Temperature and Purity Dependence of the Superconducting Critical Field, H_{c2} / E. Helfand, N. R. Werthamer // Phys. Rev. Lett. — 1964. — Vol. 13, issue 23. — P. 686–688.
2. Helfand E. Temperature and Purity Dependence of the Superconducting Critical Field, H_{c2} . II / E. Helfand, N. R. Werthamer // Phys. Rev. — 1966. — Vol. 147, issue 1. — P. 288–294.
3. Okuma S. Superconducting Properties of Disordered Films of Zn / S. Okuma [et al.] // J. Phys. Soc. Jpn. — 1983. — Vol. 52, issue 8. — P. 2639–2641.
4. Hebard A. F. Pair-breaking model for disorder in two-dimensional superconductors / A. F. Hebard, M. A. Paalanen // Phys. Rev. B. — 1984. — Vol. 30, issue 7. — P. 4063–4066.
5. Mackenzie A. P. Resistive upper critical field of $Tl_2Ba_2CuO_6$ at low temperatures and high magnetic fields / A. P. Mackenzie [et al.] // Phys. Rev. B. — 1993. — Vol. 71, issue 8. — P. 1238–1241.
6. Carrington A. Field dependence of the resistive transition in $Tl_2Ba_2CuO_{6+\delta}$ / A. Carrington [et al.] // Phys. Rev. B. — 1994. — Vol. 49, issue 18. — P. 13243–13246.
7. Osofsky M. S. Anomalous temperature dependence of the upper critical magnetic field in Bi-Sr-Cu-O / M. S. Osofsky [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1993. — Vol. 71, issue 14. — P. 2315–2318.
8. Gurevich A. Very high upper critical fields in MgB_2 produced by selective tuning of impurity scattering / A. Gurevich [et al.] // Supercond. Sci. Technol. — 2003. — Vol. 17, no. 2. — P. 278–286.
9. Braccini V. High-field superconductivity in alloyed MgB_2 thin films / V. Braccini [et al.] // Phys. Rev. B. — 2005. — Vol. 71, issue 1. — P. 012504.
10. Hunte F. Two-band superconductivity in $LaFeAsO_{0.89}F_{0.11}$ at very high magnetic fields / F. Hunte [et al.] // Nature. — 2008. — Vol. 453. — P. 903–905.
11. Jaroszynski J. Upper critical fields and thermally-activated transport of $NdFeAsO_{0.7}F_{0.3}$ single crystal / J. Jaroszynski [et al.] // Phys. Rev. B. — 2008. — Vol. 78, issue 17. — P. 174523.

12. Lee H.-S. Effects of two gaps and paramagnetic pair breaking on the upper critical field of $\text{SmFeAsO}_{0.85}$ and $\text{SmFeAsO}_{0.8}\text{F}_{0.2}$ single crystals / H.-S. Lee [et al.] // Phys. Rev. B. — 2009. — Vol. 80, issue 14. — P. 144512.
13. Franz M. Vortex state in a d -wave superconductor / M. Franz [et al.] // Phys. Rev. B. — 1996. — Vol. 53, issue 9. — P. 5795.
14. Kim W. Upper critical field of a mixed d - and s - wave superconductor / W. Kim, J.-X. Zhu, C. S. Ting // Phys. Rev. B. — 1998. — Vol. 58, issue 2. — R607–R610.
15. Kao J.-T. Pairing symmetry and upward curvature of the upper critical field in superconducting $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ / J.-T. Kao, J.-Y. Lin, C.-Y. Mou // Phys. Rev. B. — 2007. — Vol. 75, issue 1. — P. 012503.
16. Bulaevskii L. N. Anderson localization and superconductivity / L. N. Bulaevskii, M. V. Sadovskii // J. Low Temp. Phys. — 1985. — Vol. 59, issue 1/2. — P. 89–113.
17. Kotliar G. Anderson localization and the theory of dirty superconductors. II / G. Kotliar, A. Kapitulnik // Phys. Rev. B. — 1986. — Vol. 33, issue 5. — P. 3146–3157.
18. Gennes P. G. de. Boundary Effects in Superconductors / P. G. de Gennes // Rev. Mod. Phys. — 1964. — Vol. 36, issue 1. — P. 225–237.
19. Takahashi S. Theory of the upper critical field of superconducting superlattices / S. Takahashi, M. Tachiki // Phys. Rev. B. — 1986. — Vol. 33, issue 7. — P. 4620–4631.
20. Takahashi S. New phase diagram in superconducting superlattices / S. Takahashi, M. Tachiki // Phys. Rev. B. — 1986. — Vol. 34, issue 5. — P. 3162–3164.
21. Takezawa N. Angular dependence of the upper critical field in layered superconductors / N. Takezawa, T. Koyama, M. Tachiki // Physica C: Superconductivity. — 1993. — Vol. 207, issue 3/4. — P. 231–238.
22. Koyama T. Theory for the upper critical field in superconducting multilayers with interface irregularities / T. Koyama, M. Tachiki // Physica C: Superconductivity. — 1993. — Vol. 210, issue 3/4. — P. 509–517.
23. loffe L. Properties of superconductors with a smeared transition temperature / L. loffe, A. Larkin // JETP. — 1981. — Vol. 54, no. 2. — P. 378–384.
24. Zwicknagl G. E. Measured Width of Superconducting Transition: Quantitative Probe of Macroscopic Inhomogeneities / G. E. Zwicknagl, J. W. Wilkins // Phys. Rev. Lett. — 1984. — Vol. 53, issue 13. — P. 1276–1279.
25. Thuneberg E. V. Nucleation of superconductivity around weakly scattering defects / E. V. Thuneberg // J. Low Temp. Phys. — 1986. — Vol. 62, issue 1/2. — P. 27–37.
26. Spivak B. Mesoscopic Effects in Disordered Superconductors near H_{c2} / B. Spivak, F. Zhou // Phys. Rev. Lett. — 1995. — Vol. 74, issue 14. — P. 2800–2803.

27. Galitski V. M. Disorder and Quantum Fluctuations in Superconducting Films in Strong Magnetic Fields / V. M. Galitski, A. I. Larkin // Phys. Rev. Lett. — 2001. — Vol. 87, issue 8. — P. 087001.
28. Ikebe M. Dimensional Crossover in the Nb/Al₂O₃ Josephson-Coupled Multilayers / M. Ikebe [et al.] // J. Phys. Soc. Jpn. — 1993. — Vol. 62, issue 10. — P. 3680–3685.
29. Krasnov V. M. Anisotropy of the lower critical field in a Nb/Cu multilayer the evidence for 3D-2D crossover / V. M. Krasnov [et al.] // Physica C: Superconductivity. — 1993. — Vol. 215, issue 3/4. — P. 265–268.
30. Dedyu V. I. Dimensional crossover 3D-2D-3D in superconducting layered V/Cu structures / V. I. Dedyu [et al.] // JETP Lett. — 1989. — Vol. 49, issue 11. — P. 712.
31. Dedyu V. I. Dimensional effects in V/Cu superconducting superlattices / V. I. Dedyu, V. V. Kabanov, A. S. Sidorenko // Phys. Rev. B. — 1994. — Vol. 49, issue 6. — P. 4072–4032.
32. Cirillo C. Upper Critical Fields of Nb/Pd Multilayers / C. Cirillo [et al.] // J. Low Temp. Phys. — 2003. — Vol. 130, issue 5/6. — P. 509–527.
33. Cooley L. D. Effect of a dimensional crossover on the upper critical field of practical Nb-Ti alloy superconductors / L. D. Cooley, C. D. Hawes // J. Appl. Phys. — 1999. — Vol. 86, no. 10. — P. 5696–5704.
34. Karkut M. G. Anomalous upper critical fields of superconducting multilayers: Verification of the Takahashi-Tachiki effect / M. G. Karkut [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1988. — Vol. 60, issue 17. — P. 1751–1754.
35. Kuwasawa Y. Observation of anomalous transition in the upper critical fields of Nb/Nb_{0.5}Zr_{0.5} multilayers / Y. Kuwasawa [et al.] // Physica C: Superconductivity. — 1990. — Vol. 165, issue 2. — P. 173–178.
36. Kitaev A. Y. Unpaired Majorana fermions in quantum wires / A. Y. Kitaev // Physics-Uspekhi. — 2001. — Vol. 44, 10S. — P. 131.
37. Alicea J. Majorana fermions in a tunable semiconductor device / J. Alicea // Phys. Rev. B. — 2010. — Mar. — Vol. 81, issue 12. — P. 125318.
38. Lutchyn R. M. Majorana Fermions and a Topological Phase Transition in Semiconductor-Superconductor Heterostructures / R. M. Lutchyn, J. D. Sau, S. Das Sarma // Phys. Rev. Lett. — 2010. — Aug. — Vol. 105, issue 7. — P. 077001.
39. Oreg Y. Helical Liquids and Majorana Bound States in Quantum Wires / Y. Oreg, G. Refael, F. von Oppen // Phys. Rev. Lett. — 2010. — Oct. — Vol. 105, issue 17. — P. 177002.
40. Nayak C. Non-Abelian anyons and topological quantum computation / C. Nayak [et al.] // Rev. Mod. Phys. — 2008. — Sept. — Vol. 80, issue 3. — P. 1083–1159.
41. Alicea J. Non-Abelian statistics and topological quantum information processing in 1D wire networks / J. Alicea [et al.] // Nature Physics. — 2011. — Feb. — Vol. 7. — P. 412. — Article.

42. Aasen D. Milestones Toward Majorana-Based Quantum Computing / D. Aasen [et al.] // Phys. Rev. X. — 2016. — Aug. — Vol. 6, issue 3. — P. 031016.
43. Alicea J. New directions in the pursuit of Majorana fermions in solid state systems / J. Alicea // Reports on Progress in Physics. — 2012. — Vol. 75, no. 7. — P. 076501.
44. Elliott S. R. Colloquium / S. R. Elliott, M. Franz // Rev. Mod. Phys. — 2015. — Feb. — Vol. 87, issue 1. — P. 137–163.
45. Mourik V. Signatures of Majorana Fermions in Hybrid Superconductor-Semiconductor Nanowire Devices / V. Mourik [et al.] // Science. — 2012. — Vol. 336, no. 6084. — P. 1003–1007.
46. Chang W. Hard gap in epitaxial semiconductor-superconductor nanowires / W. Chang [et al.] // Nature Nanotechnology. — 2015. — Jan. — Vol. 10. — P. 232.
47. Higginbotham A. P. Parity lifetime of bound states in a proximitized semiconductor nanowire / A. P. Higginbotham [et al.] // Nature Physics. — 2015. — Sept. — Vol. 11. — P. 1017.
48. Krogstrup P. Epitaxy of semiconductor-superconductor nanowires / P. Krogstrup [et al.] // Nature Materials. — 2015. — Jan. — Vol. 14. — P. 400. — Article.
49. Albrecht S. M. Exponential protection of zero modes in Majorana islands / S. M. Albrecht [et al.] // Nature. — 2016. — Mar. — Vol. 531. — P. 206.
50. Zhang H. Ballistic superconductivity in semiconductor nanowires / H. Zhang [et al.] // Nature Communications. — 2017. — July. — Vol. 8. — P. 16025.
51. Lutchyn R. M. Topological superconductivity in full shell proximitized nanowires / R. M. Lutchyn [et al.]. — 2018. — eprint: [arXiv:1809.05512](https://arxiv.org/abs/1809.05512).
52. Woods B. D. Electronic structure of full-shell InAs/Al hybrid semiconductor-superconductor nanowires: Spin-orbit coupling and topological phase space / B. D. Woods, S. Das Sarma, T. D. Stanescu // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 99. — 16118R.
53. McMillan W. L. Tunneling Model of the Superconducting Proximity Effect / W. L. McMillan // Phys. Rev. — 1968. — Nov. — Vol. 175, issue 2. — P. 537–542.
54. Sau J. D. Non-Abelian quantum order in spin-orbit-coupled semiconductors: Search for topological Majorana particles in solid-state systems / J. D. Sau [et al.] // Phys. Rev. B. — 2010. — Dec. — Vol. 82, issue 21. — P. 214509.
55. Kopnin N. B. Proximity-induced superconductivity in two-dimensional electronic systems / N. B. Kopnin, A. S. Melnikov // Phys. Rev. B. — 2011. — Aug. — Vol. 84, issue 6. — P. 064524.
56. Kopnin N. B. Predicted Multiple Cores of a Magnetic Vortex Threading a Two-Dimensional Metal Proximity Coupled to a Superconductor / N. B. Kopnin, I. M. Khaymovich, A. S. Mel'nikov // Phys. Rev. Lett. — 2013. — Jan. — Vol. 110, issue 2. — P. 027003.

57. Kopnin N. B. Vortex matter in low-dimensional systems with proximity-induced superconductivity / N. B. Kopnin, I. M. Khaymovich, A. S. Mel'nikov // J. Exp. Theor. Phys. — 2013. — Sept. — Vol. 117, issue 3. — P. 418.
58. Stanescu T. D. Majorana fermions in semiconductor nanowires / T. D. Stanescu, R. M. Lutchyn, S. Das Sarma // Phys. Rev. B. — 2011. — Oct. — Vol. 84, issue 14. — P. 144522.

Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. Копасов А. А. Локализованная сверхпроводимость в системах с неоднородной массой куперовских пар / А. А. Копасов, Д. А. Савинов, А. С. Мельников // Известия вузов. Радиофизика. — 2016. — т. 59. — с. 1017–1029.
- A2. Kopasov A. A. Crossover between Abrikosov vortex lattice and superconducting droplet state in superconductors with modulated disorder / A. A. Kopasov, D. A. Savinov, A. S. Mel'nikov // Phys. Rev. B. — 2017. — Vol. 95. — P. 104520-1–104520-11.
- A3. Kopasov A. A. Inverse proximity effect in semiconductor Majorana nanowires / A. A. Kopasov, I. M. Khaymovich, A. S. Mel'nikov // Beilstein J. Nanotechnol. — 2018. — Vol. 9. — P. 1184–1193.
- A4. Копасов А. А. Влияние неоднородностей коэффициента диффузии на линию фазового перехода грязных сверхпроводников / А. А. Копасов, А. С. Мельников, Д. А. Савинов // "Сборник тезисов XIV Школы-конференции молодых ученых "Идеи и методы физики конденсированного состояния". — 2015. — с. 100–101.
- A5. Kopasov A. A. Crossover between Abrikosov vortex lattice and superconducting droplet state in superconductors with modulated disorder / A. A. Kopasov, D. A. Savinov, A. S. Mel'nikov // Труды XX Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". т. 1. — 2016. — с. 11–12.
- A6. Kopasov A. A. Inverse proximity effect in semiconducting nanowires / A. A. Kopasov, A. S. Mel'nikov // Труды XXI Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". т. 1. — 2017. — с. 11–12.
- A7. Копасов А. А. Обратный эффект близости в полупроводниковых проводах с индуцированной сверхпроводимостью / А. А. Копасов, И. М. Хаймович, А. С. Мельников // "Сборник тезисов XVI Школы-конференции молодых ученых "Проблемы и методы физики твердого тела и высоких давлений". — 2017. — с. 93–94.
- A8. Kopasov A. A. Inverse proximity effect in semiconducting Majorana nanowires / A. A. Kopasov, I. M. Khaymovich, A. S. Mel'nikov // Труды XXII Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". т. 1. — 2018. — с. 15–16.

- A9. Корасов А. А. Caroli - de Gennes - Matricon states in full shell proximitized nanowires /
А. А. Корасов, А. С. Мел'ников // Труды XXIII Международного симпозиума "Нанофизика и наноэлектроника". т. 1. — 2019. — с. 17—18.