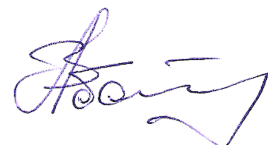


*На правах рукописи*



**АБАЛМАСОВ Вениамин Александрович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СПИНОВ  
ЭЛЕКТРОНА И ЯДЕР В КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ**

01.04.07 — «Физика конденсированного состояния»

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

**Новосибирск — 2015**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
**Суровцев Николай Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории теории нелинейных процессов  
Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН  
**Булгаков Евгений Николаевич**

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории химии и физики  
свободных радикалов  
Института химической кинетики и горения  
им. В.В. Воеводского СО РАН  
**Марьясов Александр Георгиевич**

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 года в \_\_\_:\_\_\_ ч. на заседании диссертационного совета Д 003.055.02 Института физики им. Киренского СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, Институт физики СО РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Киренского СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.055.02

доктор физико-математических наук



А.Н. Втюрин

# Общая характеристика работы

## Актуальность

Спин – собственный момент импульса элементарных частиц является ключевым понятием квантовой физики и с момента своего экспериментального обнаружения в 1922 году в опытах Штерна и Герлаха продолжает оставаться объектом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований. Спин тесно связан с магнитным моментом частиц и определяет, таким образом, магнитные свойства вещества. Спин определяет также квантовую статистику частиц, а значит и структурные и электронные свойства веществ. Кроме того, спин, как дополнительная степень свободы каждой отдельной элементарной частицы, может использоваться для хранения и передачи информации.

Спиновые эффекты в электронике активно изучаются с семидесятых годов прошлого века. Данное направление исследований получило название спинтроники [1–5]. Открытый в 1988 году эффект гигантского магнетосопротивления нашёл применение в промышленной микро(нано)электронике в качестве механизма считывания битов информации с накопителей на жёстких магнитных дисках в компьютерах.

Ещё более многообещающими являются перспективы использования спина электронов и ядер атомов кристалла в квантовой электронике в контексте создания квантового компьютера, идея которого возникла в последней четверти двадцатого века (см., например, [6, 7]). Относительно слабо взаимодействующий с другими степенями свободы спин в большей степени способен сохранять когерентность своих состояний, что является необходимым условием для проведения квантовых вычислений, и претендует, таким образом, на роль физической реализации квантового бита (кубита) информации [8, 9].

Время декогеренции квантового состояния,  $T_2$ , и время его релаксации в состояние термодинамического равновесия,  $T_1$ , в результате взаимодействия с окружающей средой являются ключевыми параметрами кубита [10] (обозначения этих времён заимствованы из физики ядерного магнитного резонанса, где их также называют временем поперечной и продольной релаксации соответственно). Релаксация спина в состояние термодинамического равновесия сопровождается диссипацией энергии и потому время релаксации, как пра-

вило, оказывается существенно большим, чем время декогеренции, и ограничивает его значение сверху.

Наибольшее значение время релаксации спина принимает для локализованных электронов из-за дискретности их орбитальных состояний и, соответственно, невозможности передачи энергии при перевороте спина электрона в магнитном поле пространственным степеням свободы электрона, а также ядер по причине малого значения ядерного магнитного момента. В качестве основного способа локализации электронов используют примесные центры в полупроводниках и полупроводниковые квантовые точки (самоорганизующиеся квантовые точки или квантовые точки, созданные с помощью электродов на поверхности двумерного электронного газа в полупроводниковых гетероструктурах).

Теоретические работы по вычислению времени релаксации спина электрона и ядер в квантовой точке появились в начале нынешнего века [11–14]. В этих работах была выявлена зависимость времени релаксации от таких основных параметров, как магнитное поле и энергия возбуждения электрона в квантовой точке, а также получена численная оценка времени релаксации для различных механизмов релаксации. Причиной релаксации спина электрона в квантовой точке является спин-орбитальное взаимодействие и сверхтонкое взаимодействие с ядрами решётки. Сверхтонкое взаимодействие является также основной причиной релаксации ядерных спинов, т.к. диполь-дипольное взаимодействие ядерных магнитных моментов значительно слабее. Роль теплового резервуара для обмена энергией при перевороте электронного спина могут играть фононы – колебания кристаллической решётки или колебания электрического поля (электронной плотности) в электрической цепи, частью которой является квантовая точка (см., например, обзоры [15–18]).

Технические сложности эксперимента и отсутствие соответствующих методик долгое время не позволяли получить экспериментальные данные для времени спиновой релаксации в квантовой точке. В настоящее время имеются данные около десятка экспериментов [19–27], которые имеет смысл сопоставить между собой и сравнить с теоретическими предсказаниями.

Сверхтонкое взаимодействие электронного и ядерных спинов приводит также к ряду интересных эффектов, из которых, возможно, наиболее известным,

изученным и востребованным в различных приложениях является динамическая поляризация ядер локализованным электроном [10, 28], при том что даже сильные магнитные поля не позволяют достичь существенной поляризации ядерных спинов, магнитный момент которых на три порядка меньше электронного. Суть эффекта заключается в следующем. Если релаксация неравновесного электронного спина в состояние термодинамического равновесия во внешнем магнитном поле происходит через сверхтонкое взаимодействие со спинами ядер, поляризация ядер достигает значений равновесной поляризации электронов в этом поле. Связано это с тем, что каждый переворот электронного спина сопровождается переворотом ядерного спина в противоположном направлении.

В работе Дьяконова и Переля [29] было высказано предположение, что динамическая самополяризация ядер возможна даже в отсутствие внешнего магнитного поля ниже критической температуры, определяемой константой сверхтонкого взаимодействия (порядка нескольких градусов Кельвина для арсенида галлия). При этом роль ядер сводится к тому, чтобы одновременно и переворачивать электронный спин, и создавать эффективное магнитное поле (поле Оверхаузера), в котором находится электронный спин. Однако данный эффект до сих пор не удалось наблюдать в эксперименте.

В настоящее время эффекты, связанные с поляризацией ядерных спинов, активно изучаются экспериментально и теоретически. Например, существенная поляризация ядер обнаружена при протекании электрического тока через двойные квантовые точки в режиме спиновой блокады [30–32] и построена теоретическая модель, описывающая наблюдаемые явления [33–35]. Интерес к подобным исследованиям связан, в частности, с тем, что ядра в поляризованном состоянии гораздо меньше влияют на декогеренцию электронного спина [36], что важно для использования последнего в качестве квантового бита информации. Поляризованные ядра могут быть полезны и в других практических приложениях, например, как источники сильного (до нескольких Тесла) локального магнитного поля.

**Целями** диссертационной работы являлись:

1. Исследование процессов релаксации электронного и ядерного спина в

квантовой точке.

2. Исследование возможности динамической самополяризации ядер в квантовой точке.

Достижение поставленных целей предполагало решение следующих **задач**:

1. Получить функциональную зависимость и дать численную оценку времени релаксации спина электрона во внешнем магнитном поле и релаксации триплетного спинового состояния двух электронов в синглетное в квантовой точке при учёте теплового движения ядер в процессе сверхтонкого взаимодействия с электроном.
2. Получить функциональную зависимость и дать численную оценку времени релаксации спина электрона в квантовой точке за счёт сверхтонкого и спин-орбитального взаимодействия при обмене энергией с колебаниями электрического поля в электрической цепи, содержащей квантовую точку.
3. Сопоставить полученные результаты по зависимости времени релаксации спина электрона от магнитного поля, энергии возбуждения электрона в квантовой точке и температуры с имеющимися экспериментальными данными.
4. Рассмотреть возможность динамической самополяризации ядерных спинов в квантовой точке. Указать условия, при которых данный эффект может наблюдаться.

**Научная новизна и значимость** полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. Предложенные в данной работе механизмы релаксации электронного и ядерного спина в квантовой точке рассмотрены впервые.
2. Показано, что при учёте тепловых колебаний ядер решётки необходимо учитывать колебания потенциала квантовой точки, что приводит к существенному сокращению скорости релаксации при длинах волн фонона больших размера квантовой точки.

3. Механизм релаксации электронного и ядерного спина посредством тепловых флуктуаций электрического поля является достаточно эффективным и зависит от параметров, которыми легко можно управлять в эксперименте, что может способствовать детальному изучению особенностей спиновой релаксации в квантовой точке. При определённых значениях регулируемых параметров (сопротивления электрического контура) данный механизм релаксации может быть ведущим.
4. Впервые рассмотрена возможность самополяризации ядерных спинов в квантовой точке при протекании через неё электрического тока. В качестве возможной причины, по которой самополяризация ядерных спинов не наблюдалась до сих пор, указана малая скорость поляризации в обычных условиях и большая скорость деполяризации.
5. Предложена схема эксперимента, которая позволяет уменьшить время поляризации ядерных спинов, сделав тем самым возможным наблюдение явления самополяризации ядерных спинов. Приведена численная оценка времени самополяризации ядер.

## Содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во **Введении** показана актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, обозначена научная новизна проделанных исследований, дано краткое содержание работы, и приведены положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** производится обзор научной литературы, отображающий историческое развитие и текущее состояние исследований по вопросам и задачам диссертационной работы. Обзор литературы производится последовательно по темам глав диссертации. В первом разделе рассматриваются теоретические работы, посвящённые релаксации спина локализованного электрона и ядер кристаллической решётки в квантовой точке. Второй раздел содержит краткое описание экспериментальных методов исследования спиновой релаксации и ссылки на работы с результатами измерений времени релаксации

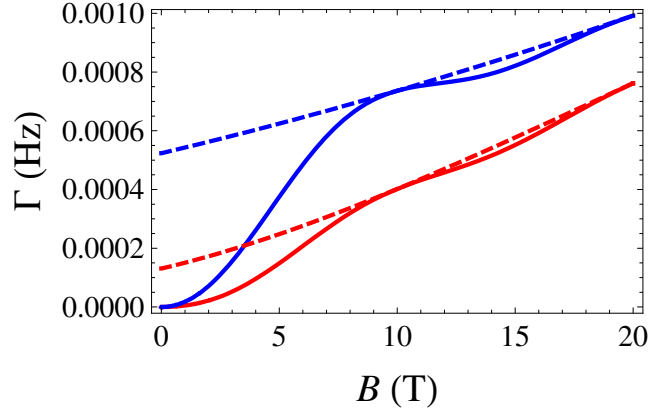


Рисунок 1: Скорость спиновой релаксации электрона в квантовой точке из GaAs в зависимости от магнитного поля при температуре  $T = 1$  К (нижняя кривая) и  $T = 4$  К (верхняя кривая). Сплошная линия соответствует случаю, когда потенциал квантовой точки колеблется вместе с кристаллической решёткой, пунктирная линия соответствует фиксированному потенциалу квантовой точки.

электронного и ядерного спина в квантовой точке. В третьем разделе приводится обзор экспериментальных и теоретических работ по эффектам, связанным со взаимодействием спина локализованного электрона и спинов ядер кристаллической решётки, в частности, с возможностью поляризации ядерных спинов в квантовой точке.

В **Главе 2** рассматривается механизм релаксации электронного спина  $\mathbf{S}$  в квантовой точке, проистекающий из контактного слагаемого сверхтонкого взаимодействия, написанного в линейном приближении по тепловым колебаниям  $\mathbf{u}(\mathbf{R})$  ядер решётки с координатой  $\mathbf{R}$  и спином  $\mathbf{I}$ :

$$V_{HF-phon} = A \mathbf{S} \cdot \mathbf{I}(\mathbf{u}(\mathbf{R}) \cdot \nabla_{\mathbf{R}}) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{R}). \quad (1)$$

Показано, что для получения правильного решения задачи необходимо учитывать также колебания потенциала квантовой точки, в котором локализован электрон,  $\delta V = (\mathbf{u}(\mathbf{R}_0) \cdot \nabla_{\mathbf{R}_0}) V(\mathbf{R}_0)$ . Это взаимодействие приводит к релаксации спина, только если учитывать подмешивание сверхтонким взаимодействием к состоянию электрона состояний с противоположным направлением спина,  $|0, \uparrow\rangle^{(1)} = |0, \uparrow\rangle + \sum_m |m, \downarrow\rangle \langle m, \downarrow | V_{HF} | 0, \uparrow \rangle / (E_0 - E_m)$ , где  $|0\rangle$ ,  $|m\rangle$  – основное и промежуточные состояния электрона в квантовой точке,  $E$  – энергия электрона. Оба вклада в процесс релаксации оказываются одного



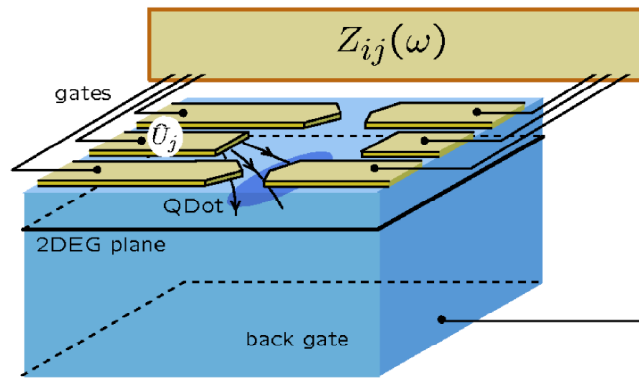


Рисунок 2: Модель квантовой точки в двумерном электронном газе электродами на поверхности гетероструктуры и эквивалентная схема электрической цепи

порядка малости и взаимно вычитаются при больших длинах волн фонона, т.е в малых магнитных полях, (Рисунок 1), когда ядра в квантовой точке и электрон в ней колеблются почти синхронно. Для нахождения скорости релаксации используется правило Ферми.

Характерной особенностью данного процесса релаксации является отсутствие в первом приближении зависимости от энергии возбуждения электрона в квантовой точке и линейная зависимость скорости релаксации от величины внешнего магнитного поля в пределе низких температур и малых длин волн фонона. В рамках данного механизма вычислено также время релаксации триплетного состояния двух электронных спинов в квантовой точке в синглетное состояние. Численная оценка скорости релаксации спина электрона указывает на низкую эффективность рассмотренного механизма. Однако учёт колебаний потенциала квантовой точки представляет как методический, так, возможно, и практический интерес применительно к другим механизмам спиновой релаксации.

В **Главе 3** рассмотрен механизм релаксации электронного спина в квантовой точке, возникающий за счёт подмешивания состояний с противоположным направлением электронного спина посредством сверхтонкого и спин-орбитального взаимодействий при взаимодействии с флуктуациями электрического поля в электрической цепи, содержащей квантовую точку (Рисунок 2). Технически вычисления матричного элемента квантового перехода соответствуют второму порядку теории возмущений по спин-зависимому вза-

имодействию  $V_{spin}$  и взаимодействию электрона с флуктуирующим электрическим полем  $V_E = e\rho_E E$ , где  $\rho_E$  – проекция координаты электрона на направление электрического поля. Далее для вычисления скорости релаксации используется правило Ферми:

$$\Gamma = \frac{2\pi e^2}{\hbar^2} \left| \sum_m \frac{\langle f|\rho_E|m\rangle\langle m|V_{spin}|i\rangle}{E_i - E_m} + \frac{\langle f|V_{spin}|m\rangle\langle m|\rho_E|i\rangle}{E_f - E_m} \right|^2 \langle \hat{E}^2 \rangle_\omega, \quad (2)$$

где  $E_{i,f,m}$  – энергии начального, конечного и промежуточного состояний электрона,  $\langle \hat{E}^2 \rangle_\omega = (R(\omega)\hbar\omega/\pi d^2) \coth(\hbar\omega/2T)$  – спектральная плотность на ларморовой частоте электрона  $\omega = |g|\mu_b B/\hbar$  в магнитном поле среднего квадрата флуктуаций электрического поля в квантовой точке диаметра  $d$ , значение которой определяется согласно флуктуационно-диссипационной теореме сопротивлением  $R(\omega)$  и температурой  $T$  цепи и соответствует тепловому шуму Джонсона-Найквиста.

В итоговом выражении для скорости релаксации можно выделить зависимость от магнитного поля  $B$  и энергии возбуждения электрона  $\Delta E$  в квантовой точке

$$\Gamma = \Gamma_0 \Delta E^m R(\omega) \omega^n \coth \frac{\hbar\omega}{2T}, \quad (3)$$

где  $m = -2$ ,  $n = 1$  для сверхтонкого взаимодействия и  $m = -4$ ,  $n = 3$  для спин-орбитального взаимодействия, что отличается от случая фононного механизма релаксации (через деформационный потенциал или пьезоэлектрическое взаимодействие) и может позволить определить действующий механизм релаксации в эксперименте. Показано, что релаксация посредством спин-орбитального взаимодействия является более эффективной, нежели посредством сверхтонкого взаимодействия, и отличается сильной зависимостью от направления магнитного и флуктуирующего электрического полей в квантовой точке (Рисунок 3).

В **Главе 4** представлен анализ имеющихся экспериментальных данных около десяти экспериментальных работ (Рисунок 4) по измерению времени спиновой релаксации в квантовой точке. Особое внимание уделено зависимости скорости релаксации от величины магнитного поля  $B$  и энергии орбитального возбуждения электрона в квантовой точке  $\Delta E$ , т.к. это позво-

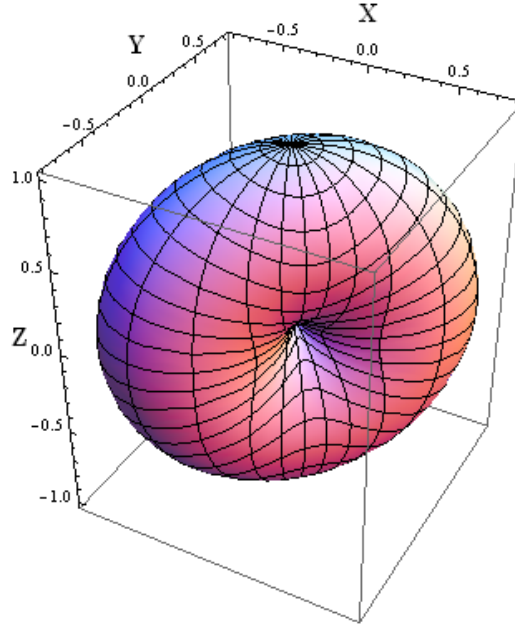


Рисунок 3: Зависимость скорости релаксации спина электрона в квантовой точке за счёт спин-орбитального взаимодействия через флуктуации электрического поля от направления магнитного поля, определяемого углами  $(\theta, \varphi)$  для параметра  $\varphi^* = -\pi/4$ . Для иных численных значений  $\varphi^*$ , определяемых направлением электрического поля  $\zeta$  в плоскости  $Oxy$  и соотношением констант спин-орбитального взаимодействия  $\gamma$ , данная форма поворачивается относительно оси  $Oz$

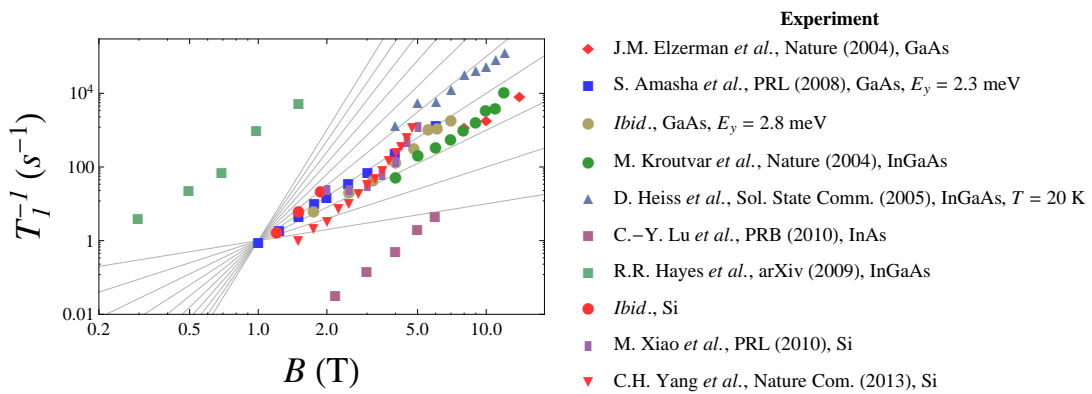


Рисунок 4: Экспериментальные данные по зависимости скорости спиновой релаксации электрона в квантовой точке от магнитного поля. Линии соответствуют степенной зависимости с показателем степени от 1 до 10

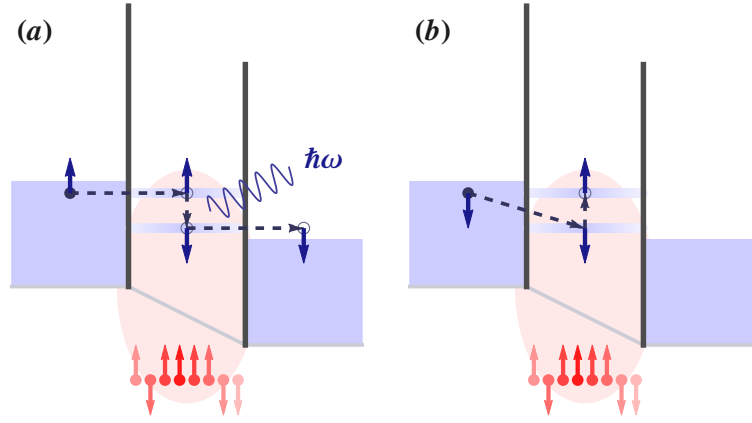


Рисунок 5: (а) Штриховые стрелки показывают направление последовательного туннелирования электрона через квантовую точку и переход между энергетическими уровнями электрона внутри точки под влиянием сверхтонкого взаимодействия со спинами ядер (изображены внизу), при этом излучается фотон или фонон с энергией  $\hbar\omega$ ; (б) переход между начальным и конечным состояниями электрона соответствует когерентному туннелированию и приводит к деполяризации ядерных спинов

ляет различить механизм релаксации в эксперименте. В большинстве случаев для того, чтобы выяснить параметры данной зависимости была произведена собственная подгонка экспериментальных данных функцией  $\Gamma = \Gamma_0 \Delta E^m B^n \coth(|g|\mu_B B/2T)$ . Зависимость скорости релаксации от энергии возбуждения электрона в квантовой точке указывает на механизм подмешивания спиновых состояний через спин-орбитальное взаимодействие. Полученные из подгонки показатели степенной зависимости  $n$  от магнитного поля скорости релаксации в квантовой точке из GaAs, 3.64 [19], 4.07 и 4.36 [20], и InGaAs, 4.7 [21], 4.8 [22] и 4.65 [25], в большей мере соответствует релаксации электронного спина посредством пьезоэлектрических фононов, где  $n = 5$ . Тем не менее для большей уверенности в этом вопросе желательно проведение дополнительных экспериментов.

В **Главе 5** рассматривается возможность динамической самополяризации ядерных спинов в квантовой точке при протекании через неё тока электронов с неравновесной нулевой поляризацией спина (Рисунок 5). Показано, что условия, необходимые для наблюдения эффекта, реализуются при нелинейном режиме протекания электрического тока через квантовую точку в ре-

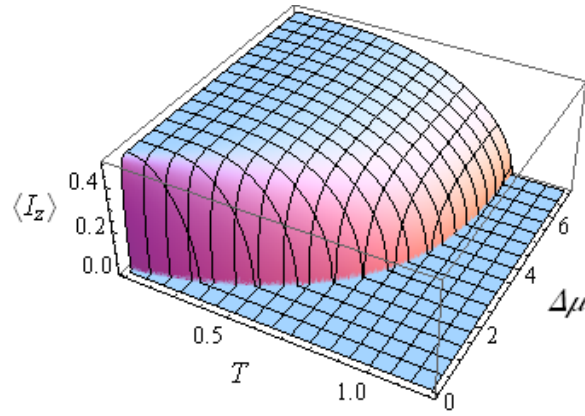


Рисунок 6: Среднее значение проекции ядерного спина  $\langle I_z \rangle$  в зависимости от температуры  $T$  и разности потенциалов  $\Delta\mu$  (в единицах критической температуры  $T_c$ ) в отсутствие деполяризации

жиме кулоновской блокады на пике проводимости. Получено уравнение на среднее значение спина ядер в зависимости от разности химических потенциалов в контактах квантовой точки  $\Delta\mu$  и температуры  $T$ :

$$I_z = \frac{\sinh^2 \frac{\Delta\mu}{2T} \sinh \frac{AI_z}{2T}}{4 \cosh \frac{\Delta\mu}{2T} + (3 + \cosh \frac{\Delta\mu}{T}) \cosh \frac{AI_z}{2T}}, \quad (4)$$

Численное решение этого уравнения представлено на Рисунке 6.

Рассмотрены механизмы релаксации электронного спина, приводящие к поляризации и деполяризации ядерных спинов и сделан вывод о значительной интенсивности деполяризации в обычных условиях за счёт когерентного туннелирования электрона через квантовую точку с переворотом электронного и ядерного спинов. Предложен способ увеличения скорости поляризации ядерных спинов за счёт включения квантовой точки в электрической контур, собственная частота колебаний которого подстраивается в резонанс с энергией зеемановского расщепления электронного спина в эффективном магнитном поле ядер. Вычислена динамика среднего спина ядер в данном случае.

В **Заключении** подытожены основные результаты диссертационной работы.

### Положения, выносимые на защиту:

1. Вклады колебаний ядер и потенциала квантовой точки в релаксацию спина электрона в квантовой точке при сверхтонком взаимодействии

имеют один порядок малости и взаимно сокращаются при длинах волн фонона больших размера квантовой точки.

2. Время релаксации электронного спина в квантовой точке с передачей энергии колебаниям электрического поля в расположенном рядом электрическом контуре существенно зависит от направления магнитного и флуктуирующего электрического полей, а также от сопротивления электрического контура и может доминировать над другими механизмами релаксации.
3. Полученный на основании собственной подгонки имеющихся экспериментальных данных показатель степенной зависимости времени релаксации спина электрона в квантовой точке из арсенида галлия от магнитного поля в большей степени соответствует релаксации через пьезоэлектрические фононы.
4. В режиме кулоновской блокады на пике проводимости через квантовую точку протекает неполяризованный по спину ток электронов, если разность химических потенциалов в контактах больше зеемановского расщепления уровня электрона в эффективном магнитном поле ядер, и, таким образом, реализуются условия необходимые для самополяризации ядерных спинов. Это подтверждается вычислением равновесного значения ядерного спина при различных значениях температуры и разности потенциалов в контактах квантовой точки.
5. Скорость поляризации ядер значительно возрастает и может превысить скорость деполяризации, что необходимо для наблюдения эффекта самополяризации, если квантовая точка включена в электрический контур, собственная частота колебаний которого подстраивается в резонанс с энергией зеемановского расщепления электронного уровня в квантовой точке.

**Личный вклад.** Автор лично продумывал постановку задачи, находил решение, производил вычисления, писал и участвовал в написании статей для научных журналов, а также представлял результаты работы на научных конференциях.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на международных конференциях: F. Marquardt and V. A. Abalmassov, "Spin relaxation in quantum dots induced by Nyquist noise", 69th Annual Meeting of the Deutsche Physikalische Gesellschaft, March 4-9, 2005, Berlin; V. A. Abalmassov, "On the possibility of the dynamic nuclear self-polarization in a quantum dot", International Symposium "Spin Waves 2013", June 9-15, 2013, Saint Petersburg.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 6-и печатных изданиях [A1–A6], 4 из которых опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК [A1–A4], 2 – в тезисах докладов и трудов конференций и симпозиумов [A5, A6]. Публикации [A1, A2] имеют индекс цитируемости в базе данных ISI 20 и 12 соответственно. Список публикаций приведен в конце диссертации.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация изложена на 95-и страницах машинописного текста и состоит из введения, обзора литературы, 4-х глав собственных расчётно-теоретических исследований, обсуждения результатов, заключения, библиографического указателя. Работа иллюстрирована 18-ю рисунками, 1-ой таблицей.

## Список цитируемой литературы

1. *Prinz, G. A.* Magnetoelectronics / G. A. Prinz // *Science*. — 1998. — Vol. 282. — Pp. 1660–1663.
2. *Zütic, I.* Spintronics: Fundamentals and applications / I. Zütic, J. Fabian, S. Das Sarma // *Rev. Mod. Phys.* — 2004. — Vol. 76, no. 2. — Pp. 323–410.
3. Spin physics in semiconductors / Ed. by M.I. Dyakonov. — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
4. *Bader, S. D.* Spintronics / S. D. Bader, S. S. P. Parkin // *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* — 2010. — Vol. 1. — Pp. 71–88.
5. *Ивченко, Е. Л.* Спиновая физика в полупроводниковых наносистемах / Е. Л. Ивченко // *УФН*. — 2012. — Т. 182, № 8. — С. 869–876.
6. Квантовый компьютер и квантовые вычисления / Под ред. В. А. Садовниченко. — Ижевск: Издательский дом "Удмуртский университет", 1999. — 287 с.
7. *Нильсен, М.* Квантовые вычисления и квантовая информация / М. Нильсен, И. Чанг. — Москва: Мир, 2006. — 824 с.
8. *Loss, D.* Quantum computation with quantum dots / D. Loss, D. P. DiVincenzo // *Phys. Rev. A*. — 1998. — Vol. 57. — Pp. 120–126.
9. *Kane, B.E.* A silicon-based nuclear spin quantum computer / B.E. Kane // *Nature*. — 1998. — Vol. 393. — Pp. 133–137.
10. *Абрагам, А.* Ядерный магнетизм / А. Абрагам. — Москва: Издательство иностранной литературы, 1963. — С. 553.
11. *Khaetskii, A. V.* Spin relaxation in semiconductor quantum dots / A. V. Khaetskii, Y. V. Nazarov // *Phys. Rev. B*. — 2000. — Vol. 61. — Pp. 12639–12642.



12. *Khaetskii, A. V.* Spin-flip transitions between zeeman sublevels in semiconductor quantum dots / A. V. Khaetskii, Y. V. Nazarov // *Phys. Rev. B.* — 2001. — Vol. 64. — Pp. 125316(1–6).
13. *Erlingsson, S. I.* Nucleus-mediated spin-flip transitions in GaAs quantum dots / S. I. Erlingsson, Y. V. Nazarov, V. I. Fal'ko // *Phys. Rev. B.* — 2001. — Vol. 64. — Pp. 195306(1–4).
14. *Erlingsson, S. I.* Hyperfine-mediated transitions between a zeeman split doublet in GaAs quantum dots: The role of the internal field / S. I. Erlingsson, Y. V. Nazarov // *Phys. Rev. B.* — 2002. — Vol. 66. — Pp. 155327(1–7).
15. *Hanson, R.* Spins in few-electron quantum dots / R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta et al. // *Rev. Mod. Phys.* — 2007. — Vol. 79, no. 4. — Pp. 1217–1265.
16. *Fabian, J.* Semiconductor spintronics / J. Fabian, A. Matos-Abiague, C. Ertler et al. // *Acta Physica Slovaca.* — 2007. — Vol. 57. — Pp. 565–907.
17. *Wu, M. W.* Spin dynamics in semiconductors / M. W. Wu, J. H. Jiang, M. Q. Weng // *Physics Reports.* — 2010. — Vol. 493. — Pp. 61–236.
18. *Zwanenburg, F. A.* Silicon quantum electronics / F. A. Zwanenburg, A. S. Dzurak, A. Morello et al. // *Rev. Mod. Phys.* — 2013. — Vol. 85, no. 3. — Pp. 961–1019.
19. *Elzerman, J. M.* Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot / J. M. Elzerman, R. Hanson, L. H. Willems van Beveren et al. // *Nature.* — 2004. — Vol. 430. — Pp. 431–435.
20. *Amasha, S.* Electrical control of spin relaxation in a quantum dot / S. Amasha, K. MacLean, I. P. Radu et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — Vol. 100. — Pp. 046803(1–4).
21. *Kroutvar, M.* Optically programmable electron spin memory using semiconductor quantum dots / M. Kroutvar, Y. Ducommun, D. Heiss et al. // *Nature.* — 2004. — Vol. 432. — Pp. 81–84.

22. *Heiss, D.* Progress towards single spin optoelectronics using quantum dot nanostructures / D. Heiss, M. Kroutvar, J. J. Finley, G. Abstreiter // *Solid State Commun.* — 2005. — Vol. 135. — Pp. 591–601.
23. *Heiss, D.* Optically monitoring electron spin relaxation in a single quantum dot using a spin memory device / D. Heiss, V. Jovanov, F. Klotz et al. // *Phys. Rev. B.* — 2010. — Vol. 82. — Pp. 245316(1–6).
24. *Lu, C.-Y.* Direct measurement of spin dynamics in InAs/GaAs quantum dots using time-resolved resonance fluorescence / C.-Y. Lu, Y. Zhao, A. N. Vamivakas et al. // *Phys. Rev. B.* — 2010. — Vol. 81. — Pp. 035332(1–5).
25. *Hayes, R. R.* Lifetime measurements (T1) of electron spins in Si/SiGe quantum dots / R. R. Hayes, A. A. Kiselev, M. G. Borselli et al. // *arXiv:0908.0173.* — 2009.
26. *Xiao, M.* Measurement of the spin relaxation time of single electrons in a silicon metal-oxide-semiconductor-based quantum dot / M. Xiao, M. G. House, H. W. Jiang // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Vol. 104. — Pp. 09680(1–4).
27. *Yang, C.H.* Spin-valley lifetimes in a silicon quantum dot with tunable valley splitting / C.H. Yang, A. Rossi, R. Ruskov et al. // *Nature Commun.* — 2013. — Vol. 4. — Pp. 2069(1–8).
28. Оптическая ориентация / Под ред. Б.П. Захарчени, Ф. Майера. — Ленинград: Наука, 1989. — С. 408.
29. *Дьяконов, М.И.* Динамическая самополяризация ядер в твёрдых телах / М.И. Дьяконов, В.И. Перель // *Письма в ЖЭТФ.* — 1972. — Т. 16, № 10. — С. 563–566.
30. *Ono, K.* Nuclear-spin-induced oscillatory current in spin-blockaded quantum dots / K. Ono, S. Tarucha // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Vol. 92, no. 25. — Pp. 256803(1–4).
31. *Koppens, F.H.L.* Control and detection of singlet-triplet mixing in a random

- nuclear field / F.H.L. Koppens, J.A. Folk, J.M. Elzerman et al. // *Science*. — 2005. — Vol. 309. — Pp. 1346–1350.
32. *Laird, E.A.* Hyperfine-mediated gate-driven electron spin resonance / E.A. Laird, C. Barthel, E.I. Rashba et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2007. — Vol. 99. — Pp. 246601(1–4).
33. *Erlingsson, S.I.* Coherent oscillations of current due to nuclear spins / S.I. Erlingsson, O.N. Jouravlev, Yu.V. Nazarov // *Phys. Rev. B*. — 2005. — Vol. 72. — Pp. 033301(1–4).
34. *Rudner, M.S.* Electrically driven reverse overhauser pumping of nuclear spins in quantum dots / M.S. Rudner, L.S. Levitov // *Phys. Rev. Lett.* — 2007. — Vol. 99. — Pp. 246602(1–4).
35. *Rudner, M.S.* Nuclear spin dynamics in double quantum dots: Fixed points, transients, and intermittency / M.S. Rudner, F.H.L. Koppens, J.A. Folk et al. // *Phys. Rev. B*. — 2011. — Vol. 84. — Pp. 075339(1–6).
36. *Khaetskii, A.V.* Electron spin decoherence in quantum dots due to interaction with nuclei / A.V. Khaetskii, D. Loss, L. Glazman // *Phys. Rev. Lett.* — 2002. — Vol. 88. — Pp. 186802(1–4).

## Публикации автора по теме диссертации

- [A1] *Abalmassov, V. A.* Electron-nuclei spin relaxation through phonon-assisted hyperfine interaction in a quantum dot / V. A. Abalmassov, F. Marquardt // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Vol. 70. — Pp. 075313(1–8).
- [A2] *Marquardt, F.* Spin relaxation in a quantum dot due to nyquist noise / F. Marquardt, V.A. Abalmassov // *Phys. Rev. B.* — 2005. — Vol. 71. — Pp. 165325(1–6).
- [A3] *Fürst, J.* Spin lifetime from hanle-effect measurements in samples with InAs quantum dots embedded in different  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  matrices / J. Fürst, H. Pascher, V. A. Abalmassov et al. // *Semicond. Sci. Technol.* — 2005. — Vol. 20. — Pp. 209–215.
- [A4] *Абалмасов, В. А.* О возможности динамической самополяризации ядерных спинов в квантовой точке / В. А. Абалмасов // *Письма в ЖЭТФ.* — 2013. — Т. 98, № 5. — С. 303–308.
- [A5] *Marquardt, F.* Spin relaxation in quantum dots induced by nyquist noise / F. Marquardt, V.A. Abalmassov // Spring Meeting / Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, Germany. — 2005. — March 4–9. — P. TT 8.5.
- [A6] *Abalmassov, V. A.* On the possibility of the dynamic nuclear self-polarization in a quantum dot / V. A. Abalmassov // International Symposium "Spin Waves 2013" / Ioffe Physical-Technical Institute, Saint-Petersburg. — 2013. — June 9–15. — P. 132.