

УТВЕРЖДАЮ  
Первый проректор Белорусского  
государственного университета

Д.М. Курлович

« 8 » июня 2023 г.

## ОТЗЫВ

оппонирующей организации по диссертационной работе

**МАРКЕВИЧА Сергея Александровича**

«Диссипативная когерентная динамика многофотонных переходов в твердотельных кубитах при моно- и бихроматическом возбуждении» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.04.07 – физика конденсированного состояния»

принят на заседании объединенного научного семинара кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, кафедры физики твердого тела и нанотехнологий и кафедры теоретической физики и астрофизики физического факультета (06 июня 2023 г., протокол № 2)

Экспертиза диссертации проводилась в соответствии с требованиями «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь», утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 17.11.2004 № 560 (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 № 190), и «Положения о совете по защите диссертаций», утвержденного постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 22.02.2005 № 19 (в ред. постановлений ВАК от 19.08.2022 № 2).

### **1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки со ссылкой на область исследования паспорта специальности**

Диссертационная работа МАРКЕВИЧА Сергея Александровича выполнена в ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» под научным руководством доктора физико-математических наук А.П.Сайко. Тема диссертации соответствует пункту 6.7 «Научные основы создания и функционирования оптико-электронных микросистем, устройств молекулярной электроники и кремниевой фотоники, электронных и оптических систем обработки информации на спиновых эффектах; нанотехнологии, наноструктуры и наноматериалы в электронике, оптике, оптоэлектронике» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585), пункту 8 «Многофункциональные материалы и технологии» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы

(постановление Совета 12 Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190), пункту 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: композиционные и многофункциональные материалы; наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156).

Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, в том числе области исследований 5. Изменение состава, структуры и свойств конденсированных сред внешними воздействиями; 7. Неравновесные состояния и процессы в конденсированных средах; 9. Физические принципы функционирования, создания и применения приборов и устройств, действие которых основано на свойствах веществ в конденсированном состоянии; 10. Моделирование структуры и свойств конденсированных сред паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, и отрасли науки: Физико-математические науки.

## **2. Научный вклад соискателя в разработку научной задачи с оценкой его значимости**

Целью диссертационной работы является теоретическое описание диссипативной когерентной динамики многофотонных переходов в «твердотельных» кубитах, сильно взаимодействующих с классическими моно- и бихроматическими электромагнитными полями, в применении к задачам резонансной флуоресценции, импульсной магниторезонансной и рамановской спектроскопии.

Научная и практическая значимость результатов диссертационной работы определяется теоретическим объяснением условий перехода между режимами сужения и уширения линий триплета Моллова для квантовых точек в твердотельных матрицах и описанием спектра многофотонного излучения при сверхсильном возбуждении двухуровневой системы; определении особенностей релаксации дважды «одетых» состояний кубита в бихроматическом поле в режиме сильной связи и обоснование возможности подавления дефазировочного эффекта неоднородности микроволнового поля в образце; описанием многофотонных переходов, возбуждаемых микроволновым и радиочастотными полями между дважды «одетыми» состояниями спиновых кубитов в стационарной ЭПР спектроскопии, для режимов слабой модуляции вблизи резонанса Раби и сильной быстрой модуляции; получением аналитических выражений для синфазного и квадратурного сигналов ЭПР с учетом частотных сдвигов Блоха-Зигерта и предсказанием уникальной возможности прямого наблюдения этого сдвига в виде осцилляций, а также в виде расщепления спектральных линий.

Публикации автора диссертации и содержание диссертационной работы демонстрируют, что МАРКЕВИЧ С.А. внес основной вклад в успешное решение поставленных научных задач и получил результаты, важные для

понимания исследуемых процессов и перспективные для их практического использования.

### **3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень**

Ученая степень кандидата физико-математических наук может быть присуждена МАРКЕВИЧУ С.А. за получение следующих новых научных результатов:

1. Аналитическое описание временных и спектральных особенностей излучения фотонов квантовой точкой, возбуждаемой нерезонансным лазерным импульсом, и режимов сужения и уширения линий спектрального триплета Моллова, которые согласуются с численными расчетами и экспериментальными данными, а также определение трех качественно различных режима диссипативной динамики двухуровневой системы при сверхсильном возбуждении, что может быть использовано для длительных манипуляций с квантовой информацией.

2. Выявление в спектре многофотонного излучения при сверхсильном возбуждении двухуровневой системы когерентной и некогерентной составляющих, существенно модифицирует не только энергетические состояния двухуровневой системы, но и ее релаксационное поведение так, что возбуждающее поле может инвертировать некоторые лоренцевы линии спектра излучения, т.е. на определенных частотах вместо, например, излучения может происходить поглощение фотонов на квазиуровнях двухуровневой системы.

3. Анализ когерентной динамики спиновых кубитов, возбуждаемых классическим бихроматическим полем, состоящем из сильного резонансного микроволнового (МВ) поля и более слабого радиочастотного (РЧ) поля с частотой, близкой к частоте Раби МВ поля, на основе которого показано, что скорости релаксации дважды «одетых» этими полями квантовых состояний кубита не зависят от фазы РЧ поля и определяются соотношением между временами продольной и поперечной релаксации. Результаты по фазовой чувствительности фурье-спектров осцилляций Раби были непосредственно использованы японскими исследователями при тестировании созданного ими портативного устройства для наблюдения импульсного магнитного резонанса на NV-центрах в алмазе.

4. Доказательство того, что декогеренция осцилляций Раби, которая вызывается неоднородностями амплитуды МВ поля и ограничивает время манипулирования кубитом, может быть эффективно подавлена при реализации резонанса Раби, что использовалось при отладке работы импульсного спектрометра магнитного резонанса на NV-центрах в алмазе. Показано также, что корреляционная функция второго порядка для резонансной флуоресценции кубита, возбуждаемого МВ и РЧ полями, обладает свойствами, подтверждающими эффект антигруппировки испускаемых фотонов, имеет место эффект коллапса и возрождения колебаний корреляционной функции.

5. Описание многофотонных переходов, возбуждаемых МВ и РЧ полями между дважды «одетыми» состояниями спиновых кубитов в стационарном ЭПР и вывод аналитических выражений для синфазного и квадратурного сигналов ЭПР с учетом частотных сдвигов Блоха-Зигерта, что позволит добиваться увеличения точности измерения амплитуды микроволнового магнитного поля в резонаторе. Предсказанная инверсия линии двухфотонного поглощения в квадратурном сигнале подтверждена экспериментально другими исследователями, что позволило им предложить калибровочный стандарт для определения амплитуды МВ поля в ЭПР спектроскопии на основе P1-центров в алмазе. Обоснована уникальная возможность прямого наблюдения частотного сдвига Блоха-Зигерта в виде осцилляций, а также в виде расщепления спектральных линий, что позволяет использовать когерентную рамановскую динамику для исследования управляемых квантовых систем в режиме сверхсильного взаимодействия

#### **4. Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации**

Результаты диссертационного исследования, касающиеся поведения фурье-спектров осцилляций Раби в части их зависимости от фазы РЧ поля, были непосредственно использованы японскими исследователями при тестировании созданного ими портативного устройства для наблюдения импульсного магнитного резонанса на NV-центрах в алмазе. Для наладки оптимальной работы этого устройства они использовали предложенную в диссертации методику подавления дополнительной декогеренции осцилляций Раби, вызываемой неоднородностями амплитуды МВ поля путем реализации резонанса Раби на дважды «одетых» квантовых состояниях кубита. Был проведен эксперимент с использованием поликристаллического фталоцианина лития по прецизионному измерению амплитуды микроволнового магнитного поля в резонаторе стационарного ЭПР спектрометра и для теоретической обработки экспериментальных данных использовались полученные в диссертации формулы для сигналов поглощения ЭПР и в режиме слабой модуляции вблизи резонанса Раби, и в режиме сильной (и быстрой) модуляции, что позволило экспериментаторам добиться увеличения точности измерения амплитуды микроволнового магнитного поля в резонаторе. Предсказанная возможность инверсии линии двухфотонного поглощения в квадратурном сигнале в режиме слабой модуляции при прохождении через резонанс Раби не только подтвердилась на эксперименте другими исследователями, но и позволила им в результате предложить калибровочный стандарт для определения амплитуды микроволнового поля в ЭПР-спектроскопии на основе P1-центров в алмазе. Предсказанная уникальная возможность прямого наблюдения частотного сдвига Блоха-Зигерта в виде осцилляций, а также в виде расщепления спектральных линий открывает новые пути использования когерентной рамановской динамики для исследования управляемых квантовых систем в режиме сверхсильного взаимодействия.

## **5. Замечания и предложения по диссертации**

1. В диссертации все электромагнитные поля рассматриваются как классические объекты, но в то же время рассматриваются эффекты с участием фотонов (§1.3.5, Гл. 4). Целесообразно было бы оценить роль квантовых эффектов в процессах, рассмотренных в диссертации, в частности, в явлениях коллапса-возрождения, многофотонных переходах, в задачах управления динамикой и релаксацией двухуровневых систем, в связи с чем можно было провести сравнение с результатами исследований, которые ведутся в этой области на кафедре теоретической физики и астрофизики БГУ.

2. При описании динамики двухуровневых систем в сильных полях может оказаться существенным диамагнитный (квадратичный по полю) вклад в гамильтониан системы, что было показано в недавних работах итальянской группы по построению калибровочно-инвариантного обобщения модели Раби (Di Stefano [et. al.], Nat. Phys. 15, 803\_808 (2019)).

В целом работа очень хорошо оформлена и ясно изложена, высказанные замечания носят характер предложений о дальнейшем развитии исследований по тематике диссертационной работы и свидетельствует о её значительном научном потенциале.

## **6. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует**

Применение современных методов исследования, высокий научный уровень диссертационной работы, качественное ее оформление в полном соответствии с требованиями ВАК, новизна, публикации в рецензируемых журналах, теоретическая и практическая значимость полученных результатов дают основание утверждать о соответствии научной квалификации МАРКЕВИЧА Сергея Александровича ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа «Диссипативная когерентная динамика многофотонных переходов в твердотельных кубитах при моно- и бихроматическом возбуждении» представляет собой самостоятельно выполненное законченное научное исследование и соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, МАРКЕВИЧ Сергей Александрович, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

На объединенном научном семинаре кафедр физики полупроводников и наноэлектроники, физики твердого тела и нанотехнологий, теоретической физики и астрофизики физического факультета БГУ, проведенном в соответствии с приказом ректора БГУ от 31.05.2023 № 331-ОД соискатель МАРКЕВИЧ С.А. выступил с докладом. На заседании состоялась дискуссия, соискатель ответил на все поставленные вопросы, также с проектом отзыва

выступил эксперт по диссертации доктор физико-математических наук, профессор Феранчук И.Д.

Отзыв оппонировавшей организации на диссертационную работу МАРКЕВИЧА Сергея Александровича заслушан, обсужден и одобрен на объединенном научном семинаре кафедр физики полупроводников и наноэлектроники, физики твердого тела и нанотехнологий, теоретической физики и астрофизики физического факультета БГУ.

На заседании присутствовали:

Всего – 16 человек, имеющих ученые степени (из них – 5 докторов наук и 11 кандидатов наук).

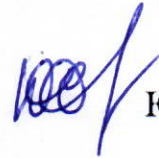
Результаты открытого голосования присутствующих на заседании участников семинара, имеющих ученые степени:  
«за» – 16, «против» – нет, воздержавшихся – нет.

Председатель научного семинара  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



В.К.Ксенович

Секретарь семинара  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



Ю.В.Сидоренко

Эксперт оппонировавшей организации  
доктор физико-математических наук,  
профессор



И.Д.Феранчук