

ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Санкт-Петербург

СОВЕЩАНИЕ ПО ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

14 – 16 мая 2025

Совещание по теории твердого тела

14 – 16 мая 2025, ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Тематика совещания охватывает современные направления теории твердого тела с акцентом на физику полупроводников, а также яркие экспериментальные достижения в физике полупроводниковых низкоразмерных систем. Цель состоит в развитии теории твердого тела и выявлении наиболее важных и актуальных направлений физики конденсированного состояния. Совещание является продолжением Совещаний по теории твердого тела, которые проходили в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 2009, 2016, 2019, 2021 и 2023 годах, и регулярных Совещаний по теории полупроводников, проводимых под руководством Л.В. Келдыша и В.И. Переля в прошлом.

Сайт Совещания: www.ioffe.ru/coherent/sstm2025

Программный комитет:

С.А. Тарасенко (ФТИ, Санкт-Петербург) tarasenko@coherent.ioffe.ru
Н.С. Аверкиев (ФТИ, Санкт-Петербург)
В.Я. Алешкин (ИФМ, Н. Новгород)
П.И. Арсеев (ФИАН, Москва)
И.С. Бурмистров (ИТФ, Черноголовка)
В.А. Качоровский (ФТИ, Санкт-Петербург)
В.М. Ковалев (ИФП, Новосибирск)
С.Г. Тиходеев (МГУ, Москва)
В.И. Юдсон (ВШЭ, Москва)

Организационный комитет:

Н.С. Аверкиев (председатель) averkiev@les.ioffe.ru
Е.Б. Лифшиц (секретарь) janli@mail.ru
И.Д. Авдеев (работа сайта) ivan.avdeev@mail.ioffe.ru
К.А. Барышников
Е.С. Вяткин
К.Ю. Голеницкий
В.А. Грабарь
А.В. Коротченков
О.О. Смирнова
С.А. Тарасенко

Приглашенные доклады

Поверхностные волны и поляритоны в одноосных средах

К.Ю. Голеницкий

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: golenitski.k@mail.ioffe.ru

Доклад посвящен общей задаче распространения поверхностных электромагнитных волн на границе изотропной и одноосной однородных сред, конкретно в случае оптической оси параллельной границе. Никаких ограничений на диэлектрические проницаемости сред, кроме вещественности, не накладывается. В этом случае все параметры волны зависят от направления распространения в плоскости границы, что приводит к новым особенностям по сравнению с изотропными средами.

Поверхностные электромагнитные волны, являющиеся особыми решениями уравнений Максвелла в среде, распространяются вдоль границы между средами в идеальном случае без рассеяния, аналогично волноводным модам. Вся энергия, переносимая волной, локализована на границе или вблизи неё. Характерные масштабы локализации составляют от 1 до 10 длин поверхностной волны ($\propto q^{-1}$) в зависимости от её типа.

Хорошо известно, что в однородных изотропных средах для существования поверхностной волны требуется отрицательность диэлектрической проницаемости одной из сред. Более строго говоря $\varepsilon_1(\omega) + \varepsilon_2(\omega) < 0$ в некотором диапазоне частот ω . Это условие выполняется, например, в средах со свободными носителями для частот меньше плазменной, в области частот оптических фононов или вблизи других возбуждаемых электромагнитным полем резонансов в среде.

Для анизотропных сред условия существования поверхностных волн не получается сформулировать так же просто. Одно из главных отличий от изотропных сред — поверхностная волна в анизотропной среде обычно является гибридной, то есть состоит из парциальных волн, а её параметры зависят от направления распространения в плоскости границы. До работ [1, 2], в которых предсказано существование поверхностных волн на границе двух диэлектриков, предполагалось, что отрицательность диэлектрической проницаемости является необходимым условием для существования волны.

В докладе будет показано, что решение поставленной задачи может быть получено в аналитическом виде [3]. Это позволило проанализировать все возможные комбинации двух сред (диэлектрик–металл, диэлектрик–диэлектрик, гиперболический метаматериал–диэлектрик и т.д.) и объединить случаи, рассмотренные другими исследователями. Будут описаны типы волн, их параметры и условия существования в зависимости от соотношений между диэлектрическими проницаемостями. В некоторых случаях, в сильно анизотропных средах локализованное решение может иметь сингулярный вид $\propto (1 + Ax) \exp(-\lambda x)$, совмещающий экспоненциальный спад на больших расстояниях и линейный рост вблизи границы [1, 4].

Список литературы

- [1] Ф.Н. Марчевский, В.Л. Стрижевский, С.В. Стрижеский, ФТТ **5**, 1501 (1984).
- [2] М.И. Дьяконов, ЖЭТФ **4**, 119 (1988).
- [3] K.Yu. Golenitskii, Phys. Rev. B **110**, 035301 (2024).
- [4] K.Yu. Golenitskii, N.S. Averkiev, arXiv:2411.16923 (2024)

Метаповерхности для максимально хиральной фотоники

М.В. Горкунов

Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова»

Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники

НИИ «Курчатовский институт» Москва, Россия

email: gorkunov@crys.ras.ru

Хиральность – геометрическое свойство самых разнообразных объектов, от молекул до галактик, не тождественных своим зеркальным отражениям. Базовым инструментом хиральной оптики является поляризованный по кругу свет, а оптическая хиральность понимается как дисимметрия отклика по отношению к знаку круговой поляризации. У естественных материалов она слаба, но в последние годы достигнуты существенные успехи в создании материалов с сильной искусственной оптической хиральностью. Интенсивное развитие хиральной фотоники обусловлено запросом на применения в системах телекоммуникаций и квантовой обработки данных. Эффективные источники, детекторы и преобразователи хирального света важны для диагностики хиральных молекул и биологических объектов, а в перспективе, и для хиральной фотохимии.

Создавая и исследуя диэлектрические метаповерхности – субволновые структуры из прозрачных материалов с большим показателем преломления – удалось вплотную приблизиться к максимальной оптической хиральности, сочетающей прозрачность для волн одной круговой поляризации с полной блокировкой волн другой круговой поляризации [1]. Ключевую роль играет возможность тонкой настройки резонансных мод диэлектрических метаповерхностей. Малыми изменениями формы и состава структур можно превращать некоторые моды как в связанные состояния в континууме (ССК), изолированные от внешних световых волн, так и в хиральные квази-ССК, изолированные от волн определенной круговой поляризации [2]. Важно, что для этого не требуются сложные наноструктуры: практическая реализация доступна в перфорированных диэлектрических слоях на прозрачных подложках [3].

В зависимости от симметрии метаповерхности, достижимы различные режимы её селективного взаимодействия со светом круговых поляризаций. Используя пару метаповерхностей в качестве хиральных зеркал, можно создать полости, в которых резонируют только молекулы определенной хиральности [4]. Зазор между метаповерхностью и металлическим зеркалом, заполненный перовскитным полупроводником, оказывается эффективным электролюминесцентным источником хирального света [5]. В метаповерхностях из поляритонных материалов реализуется хиральная сильная связь, придающая максимальную хиральность полупроводниковым экситон-поляритонам и ярко проявляющаяся в нелинейно-оптических процессах [6].

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 23-42-00091, <https://rscf.ru/project/23-42-00091/>)

Список литературы

- [1] M.V. Gorkunov, A.A. Antonov, Y.S. Kivshar, Phys. Rev. Lett. **125**, 093903 (2020).
- [2] L. Kühner et al., Light Sci. Appl. **12**, 250 (2023).
- [3] M. V. Gorkunov et al., Adv. Opt. Mater. **13**, 2402133 (2025).
- [4] K. Voronin et al., ACS Photonics **9**, 2652 (2022).
- [5] S. Kim et al., Sci. Adv. **9**, eadh0414 (2023).
- [6] C. Heimig et al., arXiv:2410.18760 (2024).

Двумерная электронно-дырочная система с инверсным спектром и сильным беспорядком

З.Д.Квон,^{1,*}

¹Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*email: kvon@isp.nsc.ru

Доклад посвящен транспортным свойствам сильно разупорядоченной двумерной (2D) системы в HgTe квантовых ямах с инверсным и полуметаллическим энергетическим спектром. В его первой части рассказывается об экспериментальном обнаружении локализации Андерсона в этой системе и ее особенностях. Поведение этой локализации принципиально отличается от наблюдаемой в широко изученных двумерных однокомпонентных электронных или дырочных системах. Показано, что в системе происходит двухступенчатая локализация: первыми локализуются двумерные дырки, как частицы с почти на порядок большей эффективной массой, чем у электронов. Затем происходит локализация электронов. Также установлено, что в исследуемой системе не наблюдается переход металл-диэлектрик: даже при величинах проводимости, заметно превышающих e^2/h , наблюдается ее уменьшение при понижении температуры.

Наблюдение андерсоновской локализации естественным образом ставит вопрос о поиске состояния топологического изолятора на основе указанной системы. И оно было найдено при охлаждении до температур ниже 0.5 К, когда происходит насыщение температурной зависимости проводимости вследствие перехода к режиму доминирующего одномерного (1D) транспорта. Подобный факт указывает на отсутствие эффектов одномерной локализации. Это означает, что в квантовых ямах с инверсным спектром отсутствует топологическая защита от локализации электронов и дырок в объеме квантовой ямы, в то время как одномерные краевые токовые состояния топологически защищены от нее. Следовательно, можно говорить о принципиально новом типе 2D топологического изолятора - 2D топологическом андерсоновском изоляторе.

В заключительной части доклада обсуждается поведение необычных мезоскопических флуктуаций проводимости в двумерном сильно разбалансированном (концентрация дырок на два-три порядка превышает электронную) полуметалле на основе HgTe в режиме слабой локализации. Эти флуктуации существуют в макроскопических образцах с характерными размерами более 100 мкм и имеют аномально высокую по величине амплитуду ($\sim 10e^2/h$) и аномальную зависимость от напряжения на затворе, магнитного поля (квазипериодичность и подавление при $B > 0,5$ Тл) и температуры (экспоненциально сильная). Также их амплитуда критически зависит от степени беспорядка. Показано, что при той же величине проводимости (около 1 кОм/квадрат) они полностью отсутствуют в электронном металлическом состоянии, реализуемом в том же образце. На основании сделанных предположений о возникновении коллективного состояния, представляющего собой квадратную сетку электронных проводников в поле флуктуационного потенциала примесей, экранированных тяжелыми дырками, концентрация которых значительно превышает концентрацию существенно более легких электронов.

Работа поддержана грантом РФФ-23-72-30003.

Природа плазменных возбуждений в плазмонном кристалле

В. М. Муравьев

¹ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2
*e-mail: muravev@issp.ac.ru

Плазмонный кристалл представляет собой двумерную электронную систему (ДЭС) с периодическим затвором, нанесённым на поверхность кристалла. Пионерские эксперименты по изучению плазменных волн в полупроводниковых двумерных системах были проведены более 40 лет тому назад именно на плазмонном кристалле [1,2]. С тех пор эта система стала платформой для открытия множества новых физических явлений. Среди примеров можно упомянуть наблюдение мини-зон в плазмонном спектре, двумерных плазмонов в слоистых материалах и различных плазмонных кристаллических фаз.

В настоящей работе исследованы плазменные возбуждения в спектре пропускания плазмонного кристалла, изготовленного из полупроводниковой гетероструктуры AlGaAs/GaAs. Эксперимент показал, что плазмонный кристалл поддерживает только одну фундаментальную плазменную моду с волновым вектором $q=2\pi/p$ (p – период плазмонного кристалла), которая переходит из незранированного состояния при узких затворах в экранированное состояние для широких затворов. Мы разработали аналитический подход, с помощью которого удалось точно предсказать частоту и ширину плазменных возбуждений в плазмонном кристалле.

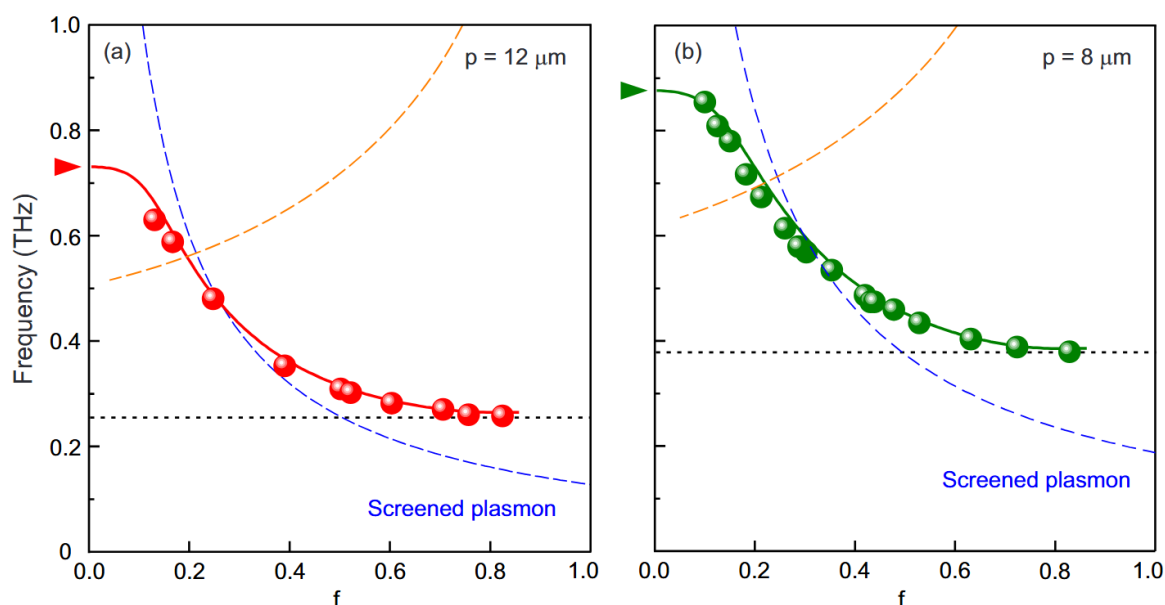


Рис. Частота фундаментальной плазменной моды в зависимости от фактора заполнения затворов $f=lg/p$, измеренная для двух периодов плазмонного кристалла $p=8$ и 12 мкм. Электронная концентрация $n=1.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Расстояние от затворов до ДЭС 0.22 мкм.

Литература

- [1] Allen Jr., S. J. and Tsui, D. C. and Logan, R. A., **Phys. Rev. Lett.** **38**, 980 (1977).
- [2] Theis, T. N. and Kotthaus, J. P. and Stiles, P. J., **Solid State Commun.** **24**, 273 (1977).

30 лет переходу металл-изолятор в коррелированных 2D системах

В.М. Пудалов,^{1,*}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*email: pudalov@lebedev.ru

Свойства двумерных (2D) электронных систем в течение полувека были предметом повышенного интереса. Тем не менее, после многих лет исследований, основные состояния 2D электронной системы (2DES) при наличии беспорядка и электрон-электронного взаимодействия остаются открытым вопросом. На основе скейлинговых аргументов, Абрахамс и др. показали, что наличие сколь угодно малого беспорядка приведет к локализации состояний невзаимодействующих 2D-электронов [1]. Хотя это мнение оставалось общепринятым, оно многократно подвергалось сомнению в связи с реально существующими в 2D системах сильными межэлектронными корреляциями. Кульминацией сомнений явилось наблюдение в 1994-1995гг [2] сильного ($\sim 10\times$) падения сопротивления $\rho(T)$ при понижении температуры T в кремниевой Si-МДП структуре с высокой подвижностью. Продемонстрированное в [2] критическое скейлинговое поведение $\rho(T)$ поставило вопрос о возможном переходе металл-изолятор (MIT) в сильно коррелированной (СК) 2D системе, в условиях когда отношение кулоновской энергии к энергии Ферми $r_s \gg 1$. Эти эксперименты стимулировали развитие двухпараметрической скейлинговой теории [3], которая предсказывает появление критической точки MIT. Однако, применимость данной теории к Si-МДП системам, демонстрирующим 2D-MIT, не подтвердилась.

Вопрос о природе основного состояния СК 2D системы осложняется еще и явлениями, сопутствующими MIT- тенденцией к вигнеровской кристаллизации (WC) или к стонеровской ферромагнитной неустойчивости. Для однородного состояния 2D системы теория предсказывает возникновение WC в пределе больших r_s , но тип спинового упорядочения как конечного, так и промежуточных состояний пока дискутируется. С другой стороны, отрицательная сжимаемость 2D системы с большими r_s [4,5] способствует фазовому расслоению. Поэтому неудивительно, что на пути к WC предсказано возникновение фазово-неоднородных промежуточных состояний (микрорезмульсии) [6]. В экспериментах, фазовое расслоение в Si-МДП [7,8] было выявлено из данных по транспорту и термодинамике при $r_s \approx 10$, а недавно изучалось еще и в 2DH слоях в GaAs. О наблюдении WC неоднократно сообщалось (однако, на основании косвенных данных): для 2DH в GaAs и AlAs, для 2DE в ZnO и в монослоях MoSe₂. Совсем недавно, прямым методом СТМ была визуализирована решетка WC в бислоях графена, но в присутствии магнитного поля.

Список литературы

- [1] E. Abrahams et al., Phys. Rev. Lett. **42**, 673 (1979).
- [2] S. V. Kravchenko et al., Phys. Rev. B **50**, 8039 (1994); *ibid* **51**, 7038 (1995).
- [3] A. Punnoose and A. M. Finkel'stein, Science **310**, 289 (2005).
- [4] M. S. Bello, E. I. Levin, B. I. Shklovskii, A. L. Efros, JETP **53**, 822 (1981).
- [5] S. V. Kravchenko, V. M. Pudalov, S.G. Semenchinsky, Phys. Lett. A **141**, 71 (1989).
- [6] B. Spivak, and S. A. Kivelson, Phys. Rev. B **70**, 155114 (2004).
- [7] V. M. Pudalov, JETP Lett. **116**, 456 (2022).
- [8] L. A. Morgun, A. Yu. Kuntsevich, V. M. Pudalov, Phys. Rev. B **93** 235145 (2016).

Дробно-металлические состояния, волны спиновой плотности и необычная сверхпроводимость в двухслойном графене

А.Л. Рахманов^{1,*}, А.О. Сбойчаков¹, А.В. Рожков¹

¹ Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва

* alrakhmanov@mail.ru

Нами рассмотрены возможные электронные состояния в трех основных конфигурациях двухслойного графена (AB графен или фаза Бернала, AA или простой двухслойный графен и скрученный под магическим углом двухслойный графен) [1-4]. Показано, что для всех трех систем важнейшим фактором является электрон-электронное взаимодействие. Это обстоятельство связано с видом зонной структуры перечисленных материалов, а именно, параболическим касанием зон для AB графена, нестингом поверхности Ферми для AA графена и наличием плоских зон вблизи поверхности Ферми для скрученного под магическим углом графена. С изменением допирования, величины затворного напряжения, нарушающего симметрию между слоями, и температуры во всех перечисленных системах происходят каскады фазовых переходов. Рассмотренные нами фазы включают, например, дробно-металлические состояния, в которых электроны на поверхности Ферми полностью или частично поляризованы по спину и/или по индексу конуса Дирака. Во всех системах экранированное кулоновское отталкивание ведет к стабилизации сверхпроводящего состояния. В случае AB графена это сверхпроводимость p -типа, а в случае скрученного графена возникает так называемая нематическая сверхпроводимость. При этом в AB и скрученном графене сверхпроводимость сосуществует с волной спиновой плотности. Полученные результаты находятся в неплохом согласии с экспериментальными данными. В частности, вычисленная температура сверхпроводящего перехода и ширина щели в состоянии волны спиновой плотности для двухслойного AB графена согласуются с результатами измерений.

Список литературы

- [1] A.L. Rakhmanov, A.V. Rozhkov, A.O. Sboychakov, F. Nori, Phys. Rev. B **107**, 155112 (2023).
- [2] A.O. Sboychakov, A.V. Rozhkov, A.L. Rakhmanov, Phys. Rev. B, **108**, 184503 (2023).
- [3] A.O. Sboychakov, A.V. Rozhkov, A.L. Rakhmanov, Phys. Rev. B **109**, 094505 (2024).
- [4] A.O. Sboychakov, A.V. Rozhkov, A.L. Rakhmanov, Physica E **165**, 116118 (2025).

Эффекты междолинного смешивания в монослоях дихалькогенидов переходных металлов

М.В. Дурнев,¹ В.Н. Манцевич,² И.С. Кривенко,³ Д.С. Смирнов^{1,*}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Гамбургский университет, Гамбург, Германия

*email: smirnov@mail.ioffe.ru

Экстремумы зон монослоёв дихалькогенидов переходных металлов расположены в двух противоположных неэквивалентных точках шестиугольной зоны Бриллюэна. Обычно электронные, дырочные и экситонные состояния рассматриваются в двух долинах независимо за исключением рассеяния на коротковолновых фононах [1]. В этой работе мы показываем, что состояния двух долин могут эффективно и статически смешиваться на латеральном гетеропереходе между различными монослоями [2] или на хирально упорядоченных спинах магнитных примесей.

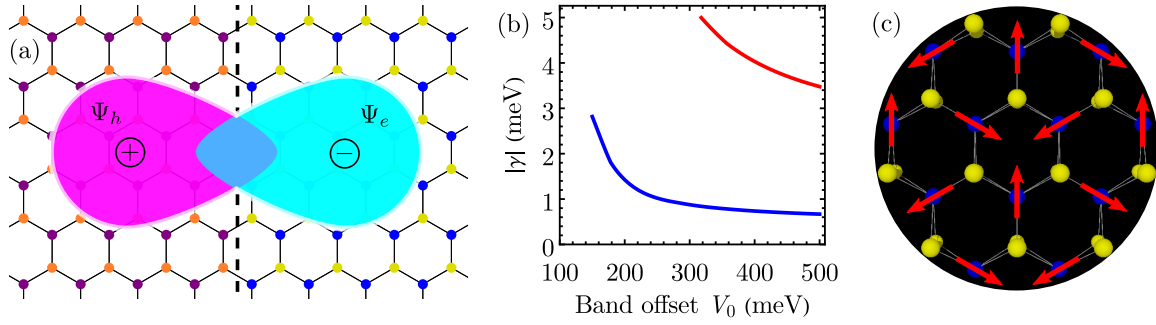


Рис. 1: (a) Интерфейсный экситон на латеральном гетеропереходе. (b) Константа междолинного смешивания электрона в интерфейсном экситоне в зависимости от величины разрыва зон для структур на подложке SiO_2 (красная кривая) и инкапсулированных hBN (синяя кривая). (c) Хиральное упорядочение магнитных атомов на монослое.

В первом случае [рис. 1(a)] разрыв зон II рода приводит к формированию пространственно не прямых интерфейсных экситонов. Результат расчёта константы междолинного смешивания в таком экситоне представлен на рис. 1(b). Это смешивание может приводить к линейной поляризации фотolumинесценции в магнитном поле в плоскости образца и к междолинному поперечному g -фактору электронов, который удалось обнаружить экспериментально [3].

Также нами было описано косвенное обменное взаимодействие магнитных примесей, расположенных на монослое. Оно, совместно с прямым антиферромагнитным взаимодействием, хирально упорядочивает спины магнитных примесей, как показано на рис. 1(c). Такая магнитная текстура приводит различным эффектам, запрещённым в однородном монослое: долинному смешиванию электронов, просветлению междолинных оптических переходов, расщеплению внутримолиновых переходов, циркулярному дихроизму, а также аномальному антиферромагнитному эффекту Холла.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-12-00142.

Список литературы

- [1] D.S. Smirnov et al., 2D Mater. **9**, 045016 (2022).
- [2] M.V. Durnev and D.S. Smirnov, arXiv:2408.10170 (2024).
- [3] E. Yalcin et al., Phys. Rev. B **110**, L161405 (2024).

Первопринципное моделирование скоррелированной электрон-ионной динамики экситонных возбуждений

В. В. Стегайлов, И. Д. Федоров, Н. А. Фоминых

*Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия
Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия*

**email: stegailov@jht.ru*

Классические подходы для описания экситонных возбуждений в твердых телах обычно предполагают или неизменность решеточного потенциала, или достаточность квазигармонического приближения для описания фононной подсистемы. В то же время, недавние работы авторов показали, что в терминах экситонных возбуждений можно описывать и эффекты, наблюдаемые в плотных молекулярных флюидах при нагреве и/или сжатии [1-4]. Примененные для исследования подобных систем методы первопринципной молекулярной динамики дают возможность описания скоррелированной электрон-ионной динамики экситонных возбуждений. В докладе будут представлены соответствующие теоретико-вычислительные подходы и их возможные применения для описания экситонов в твердых телах.

Список литературы

- [1] I.D. Fedorov, N.D. Orekhov, V.V. Stegailov, Phys. Rev. B **101**, 100101 (2020).
- [2] I.D. Fedorov, V.V. Stegailov, ChemPhysChem, **24**, e202200730 (2023).
- [3] И.Д. Федоров, В.В. Стегайлов, Письма в ЖЭТФ **113**, 392–398 (2021).
- [4] I.D. Fedorov, V.V. Stegailov, J. Chem. Phys. **161**, 154503 (2024).

Сверхпроводящий диодный эффект

Я.В. Фоминов,^{1,*}

¹Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

*email: fominov@itp.ac.ru

В докладе будет дан краткий обзор активно развивающейся сейчас области, связанной с не взаимными эффектами в сверхпроводящем транспорте. Иначе это явление можно назвать сверхпроводящим диодным эффектом. Суть эффекта состоит в различии свойств системы при протекании сверхтока в двух противоположных направлениях. Эффект может возникать при одновременном нарушении симметрии обращения времени и инверсии. Конкретные же физические механизмы могут быть весьма разнообразны. Они могут порождаться магнитным (и, более узко, обменным) полем, спин-орбитальным взаимодействием, геометрической асимметрией системы. Эти эффекты могут приводить к не взаимности переноса заряда как в системах, однородных в направлении протекания тока, так и в джозефсоновских контактах.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-12-00357.

Список литературы

- [1] Ya.V. Fominov, D.S. Mikhailov, *Asymmetric higher-harmonic SQUID as a Josephson diode*, Phys. Rev. B **106**, 134514 (2022).
- [2] G.S. Seleznev, Ya.V. Fominov, *Influence of capacitance and thermal fluctuations on the Josephson diode effect in asymmetric higher-harmonic SQUIDs*, Phys. Rev. B **110**, 104508 (2024).
- [3] D.S. Kalashnikov, G.S. Seleznev, A. Kudriashov, Y. Babich, D.Yu. Vodolazov, Ya.V. Fominov, V.S. Stolyarov, *Diode effect in Shapiro steps in an asymmetric SQUID with a superconducting nanobridge*, готовится к публикации.
- [4] Yu.A. Dmitriyev, Ya.V. Fominov, *Superconducting orbital diode effect in SN bilayers*, готовится к публикации.
- [5] D.A. Chuklanov, Ya.V. Fominov, *Diode effect in superconductors with spin-orbit interaction*, готовится к публикации.

Взаимодействие сверхпроводящего конденсата и квазичастиц в гибридных структурах с нанопроводами Al/InAs

Е.В. Шпагина, Е.С. Тихонов, В.С. Храпай*

ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, Черноголовка, Российская Федерация

Гибридные структуры мезоскопического сверхпроводника и полупроводника привлекают сейчас достаточный интерес в научном сообществе. В основном, этот интерес связан с необычными свойствами подщелевых квазичастиц, заселяющих Андреевские связанные состояния или Майорановские нулевые моды. Роль сверхпроводящего параметра порядка при этом считается вторичной - он требуется, чтобы открыть щель для обычных квазичастиц и навести сверхпроводящие корреляции в полупроводнике при помощи эффекта близости. В настоящем докладе будет обращено внимание на, может быть - частный, но все же важный аспект взаимодействия параметра порядка с квазичастицами при достаточном отклонении от теплового равновесия.

Взаимодействие квазичастиц и куперовского конденсата выражается явным образом в зависимости величины параметра порядка от распределения квазичастиц по энергиям в уравнении самосогласования БКШ (Бардин-Купер-Шриффер). Известно, что в мезоскопических металлических структурах это приводит к заметной бистабильности параметра порядка в функции приложенного напряжения [1-3]. Недавно, подавление квазичастицами параметра порядка в сверхпроводящих терминалах [4] и островках [5] было обнаружено в структурах нанопроводов InAs с эпитаксиально выращенным алюминием и интерпретировано в терминах перегрева.

В этом докладе будет рассказано о недавних экспериментах нашей группы в Черноголовке со сверхпроводящими островками в нанопроводах Al/InAs [6]. Нам удалось реализовать три возможных сценария подавления сверхпроводимости: критическим током, критическим напряжением и перегревом. Будет обсуждено, как связь островка с нормальными или сверхпроводящими макроскопическими терминалами влияет на реализацию того или иного сценария, какую роль играет здесь полупроводник, захват квазичастиц на островке и соотношение времен диффузии и неупругой релаксации. Наконец, если позволит время, будут кратко обсуждаться свежие результаты, демонстрирующие роль остаточной квазичастичной неравновесности применительно к бистабильности сверхпроводящего параметра порядка в островке.

*email: dick@issp.ac.ru

Список литературы

- [1] R.S. Keizer, M.G. Flokstra, J. Aarts, T.M. Klapwijk, Phys. Rev. Lett. **96**, 147002 (2006)
- [2] I. Snyman and Yu.V. Nazarov, Phys. Rev. B **79**, 014510 (2009)
- [3] N. Vercruyssen, T.G.A. Verhagen, M.G. Flokstra, J.P. Pekola, T.M. Klapwijk, Phys. Rev. B **85**, 224503 (2012)
- [4] A. Ibabe, M. Gomez, G.O. Steffensen, T. Kanne, J. Nygard, A.L. Yeyati, E.J.H. Lee, Nat. Commun. **14**, 2873 (2023)
- [5] A. Ibabe, G.O. Steffensen, I. Casal, M. Gomez, T. Kanne, J. Nygard, A.L. Yeyati, E.J.H. Lee Nano Lett. **24**, 6488, (2024)
- [6] E.V. Shpagina, E.S. Tikhonov, D. Ruhstorfer, G. Koblmueeller, V.S. Khrapai, Phys. Rev. B **109**, L140501 (2024)

Устные доклады

Соответствие объём-граница на переходе от спинового к целочисленному квантовому эффекту Холла в топологических сверхпроводниках

И. С. Бурмистров,^{1,*} М. В. Парфёнов¹

¹Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, г. Черноголовка, Россия

*email: burmi@itp.ac.ru

Спиновый квантовый эффект Холла и целочисленный квантовый эффект Холла два родственных топологических фазовых перехода в двумерных электронных системах. Их тесная связь делает возможным трансформацию от спинового (с квантованием четными целыми числами) к целочисленному квантовому эффекту Холла в двумерных топологических сверхпроводниках при увеличении зеемановского расщепления. Изучены тонкости соответствия объём-граница и трансформация безмассовых краевых мод и объёмных топологических возбуждений (инстантонов) при таком кроссовере.

Результаты опубликованы в [1]. Работа выполнена в рамках госзадания ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН.

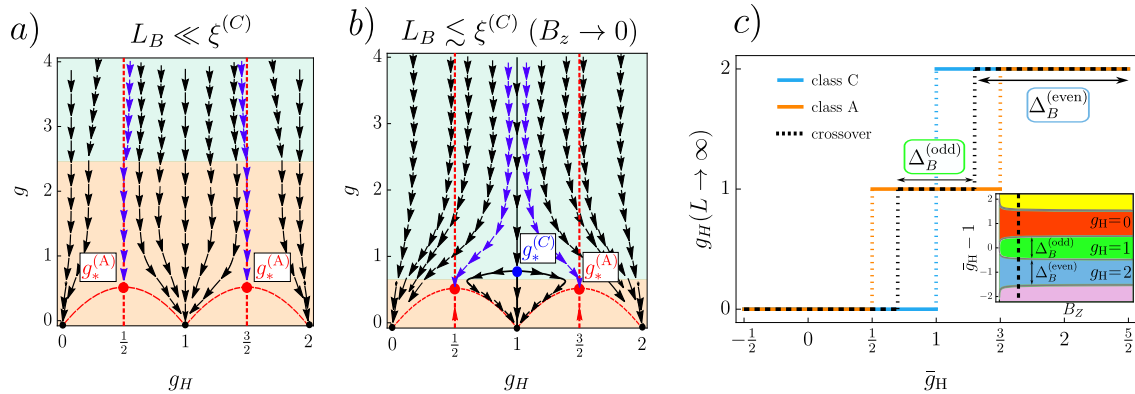


Рис. 1: Кроссовер в случае сильного (а) и слабого (б) зеемановского расщеплений в координатах поперечный спиновый (g_N) и продольный спиновый (g) кондактансы. (с) Квантование поперечного спинного кондактанса в термодинамическом пределе $L \rightarrow \infty$ как функция затравочного значения $\bar{g}_N$ для спинного квантового эффекта Холла (синия линия), обычного целочисленного квантового эффекта Холла (оранжевая линия), и при конечном значении зеемановского расщепления (черная линия). Вставка: фазовая диаграмма спинного квантового эффекта Холла при наличии зеемановского расщепления.

Список литературы

[1] M.V. Parfenov, I.S. Burmistrov, arXiv:2502.21230

Электронный транспорт в квантовых параэлектриках

В.И. Юдсон,^{1,*}

¹Международная лаборатория физики конденсированного состояния НИУ ВШЭ,
Москва, Россия

*email: vyudson@hse.ru

Электронный транспорт в легированных квантовых параэлектриках (SrTiO_3 и др.) имеет ряд особенностей, включая выраженный режим температурной зависимости сопротивления $\sim T^2$. Мы изучаем электронную проводимость в легированном квантовом параэлектрике, используя модель электронов, связанных с мягкой поперечной оптической (ТО) модой через двухфононный механизм. Для температур выше частоты мягкой моды, но ниже некоторого характерного масштаба энергии E_0 , сопротивление пропорционально квадрату числа заполнения фононов, т.е., действительно, ведет себя как $\sim T^2$. Скорость рассеяния электронов в этом режиме не зависит от плотности числа носителей и не зависит от кроссовера между вырожденными и невырожденными режимами, в соответствии с экспериментом. Температуры выше E_0 соответствуют неквазичастичному режиму, который мы анализируем [1], отображая уравнение Дайсона на задачу суперсимметричной квантовой механики.

Список литературы

[1] A. Kumar, V.I. Yudson, and D.L. Maslov, Phys. Rev. Lett. **126**, 076601 (2021).

Отрицательное магнитосопротивление в антиферромагнитных металлах из-за обменного расщепления

П.Д. Григорьев,^{1,2,*} Н.С. Павлов,³ И.Р. Шеин,⁴ А.В. Садаков,⁴ О.А. Соболевский,⁴ Е. Мальцев,⁵ И.А. Некрасов,⁶ В. М. Пудалов⁴

¹Институт теоретической физики им. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

²НИТУ “МИСИС”, Москва, Россия

³Институт электрофизики РАН, Екатеринбург, Россия

⁴Научный центр В.Л. Гинзбурга ФИАН, Москва, Россия

⁵Институт исследований твердого тела и материалов им. Лейбница, Дрезден

⁶Институт электрофизики РАН, Екатеринбург, Россия

*email: grigorev@itp.ac.ru

Слоистые топологически нетривиальные и тривиальные полуметаллы с антиферромагнитным (АФМ) упорядочением магнитной подрешетки обладают отрицательным магнитосопротивлением, которое хорошо коррелирует с изменением АФМ намагниченности в магнитном поле. Об этом эффекте сообщалось в ряде экспериментальных исследований с EuFe_2As_2 [1], EuSn_2As_2 [2], EuSn_2P_2 [3], EuIn_2As_2 [4] и др., где сопротивление квадратично уменьшается с увеличением поля на величину около 4-6% вплоть до поля спин-флип. Несмотря на то, что этот эффект хорошо документирован экспериментально, его теоретическое объяснение до сих пор отсутствует. Мы предлагаем [5] новый теоретический механизм, описывающий наблюдаемое магнитосопротивление и не предполагающий ни его топологического происхождения, ни шероховатости поверхности, ни их потенциальной дефектной структуры, ни электрон-магнонного рассеяния. Этот новый механизм связан с нарушением симметрии между АФМ подрешетками и соответствующим изменением координатной зависимости волновых функций электронов проводимости для спиновых подзон, которая сжимает волновые функции и усиливает рассеяние электронов на точечных дефектах. Проведенные численные расчеты методом функционала плотности подтверждают это сжатие. Предложенный механизм магнитосопротивления применим к широкому классу слоистых АФМ-упорядоченных полуметаллов. Мы также провели детальное экспериментальное исследование этого эффекта в EuSn_2As_2 и сравнили его с нашими теоретическими предсказаниями. Рассчитанное магнитосопротивление согласуется с экспериментальными данными для кристаллов различного состава.

Список литературы

- [1]. J.J. Sanchez, G. Fabbris, Y. Choi et al., Phys. Rev. B **104**, 104413 (2021).
- [2]. Huijie Li, Wenshuai Gao, Zheng Chen et al., Phys. Rev. B **104**, 054435 (2021).
- [3]. Xin Gui, Ivo Pletikosic, Huibo Cao, et al., ACS Centr. Sci. **5**(5), 900 (2019).
- [4]. F. H. Yu, H. M. Mu, W. Z. Zhuo, et al. Phys. Rev. B **102**, 180404(R) (2020).
- [5]. P. D. Grigoriev, N. S. Pavlov, I. A. Nekrasov et al., arXiv:2405.18046 .

Особенности диффузии "быстрых" и "медленных" экситонов в двумерных полупроводниках

В.Н. Манцевич,¹ В.В. Палюлин²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Сколтех, Москва, Россия

*email: vmantsev@gmail.com

Поглощение света в полупроводнике приводит к возбуждению электронов из валентной зоны в зону проводимости и благодаря кулоновскому взаимодействию происходит формирование экситонов [1]. В двумерных полупроводниках экситоны могут перемещаться по всей площади образца, что в основном определяет оптоэлектронные свойства полупроводников. Недавние экспериментальные исследования транспорта экситонов показали, что экситоны часто делятся на две популяции: "медленные" и "быстрые" или захваченные в ловушки, образованные примесями или дефектами, и свободные. Между двумя популяциями может происходить обмен, приводящий к такому неочевидному явлению, как нелинейная или отрицательная эффективная диффузия [2,3].

Предложен теоретический подход для описания особенностей диффузионного транспорта экситонов в двумерных полупроводниковых наноструктурах при наличии в системе двух популяций экситонов. Подход основан на применении модифицированной модели подвижных-неподвижных (mobile-immobile) экситонов, которая ранее была применена нами для объяснения особенностей фотолюминесценции, наблюдаемой в нанопластинах [4,5], а также анализа диффузии экситонов в слоистых перовскитах и монослоях дихалькогенидов переходных металлов [6]. Показано, что простые марковские модели позволяют объяснить возникновение отрицательной диффузии на промежуточных временных масштабах. Хотя отрицательная диффузия может возникать из-за нелинейных (например, бинарных) взаимодействий, предложен простой механизм, основанный на взаимодействии двух подсистем экситонов с существенно различными коэффициентами диффузии [7]. Показано, что аналитическая теория хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными. Средние коэффициенты диффузии для объединенной популяции экситонов аналитически выражаются через коэффициенты диффузии "быстрых" и "медленных" экситонов. Простые аналитические выражения для эффективных коэффициентов диффузии, полученные в предельных случаях, представляют интерес как для теоретического, так и для экспериментального анализа особенностей диффузионного транспорта экситонов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-12-00020.

Список литературы

- [1] J. Frenkel, Phys. Rev. **37**, 17 (1931).
- [2] E. Wietek, M. Florian, J. Göser, et. al., Phys. Rev. Lett. **132**, 016202 (2024).
- [3] A. M. Berghuis, T. Raziman, A. Halpin, et. al., J. Phys. Chem. Lett. **12**, 1360 (2021).
- [4] F. T. Rabouw, J. C. van der Bok, P. Spinicelli, et. al., Nano Lett., **16**, 2047 (2016).
- [5] A. A. Kurilovich, V. N. Mantsevich, K. J. Stevenson, et.al., Phys. Chem. Chem. Phys., **22**, 24686 (2020).
- [6] A. A. Kurilovich, V. N. Mantsevich, Y. Mardoukhi, et.al., Phys. Chem. Chem. Phys., **24**, 13941 (2022).
- [7] O. P. Adejumbi, V. N. Mantsevich, V. V. Palyulin, Phys. Rev. E **110**, 054139 (2024).

Спиновая динамика экситонов в ансамбле непрямозонных (In,Al)As/AlAs квантовых точек

Т.С. Шамирзаев,^{1,*} Д.С. Смирнов,² В.Н. Манцевич,³ Д.Р. Яковлев,^{2,4}
М. Bayer⁴

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, С.-Петербург, Россия

³Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

⁴Experimentelle Physik 2, Technische Universität Dortmund, Germany

*email: sha_tim@mail.ru

Степень индуцированной магнитным полем циркулярной поляризации экситонной фотолюминесценции (ФЛ), в ансамблях непрямозонных (In,Al)As/AlAs КТ, немонотонно зависит от размера точки. Она положительна на высокоэнергетической стороне спектра и отрицательна на низкоэнергетической (Рис.1(a)). Ранее было сделано предположение о том, что такая немонотонная зависимость обусловлена изменением знака g фактора светлого экситона (g_b) при уменьшении размера КТ и описывается быстрой спиновой динамикой между состояниями светлого экситона. Для проверки этого предположения проведено исследование динамики заселенности экситонных состояний в ансамбле (In,Al)As/AlAs КТ. В предположении квази-равновесной заселенности состояний светлого экситона знак циркулярной поляризации определяется знаком экситонного g фактора, определяемого соотношением $g_b = g_{hh} - g_e$, где g_{hh} и g_e продольные g фактора тяжелой дырки и электрона. Поскольку в непрямозонных КТ $g_e = +2$, g_b определяется зависимостью g_{hh} от размера КТ. Измерения g_{hh} методом комбинационного рассеяния света с переворотом спина показали, что в больших КТ $g_{hh} > 2$ и монотонно растет с уменьшением размера КТ. Динамика степени циркулярной поляризации экситонной ФЛ вдоль контура полосы в магнитном поле 10 Тл (Рис.1(b)) немонотонна на протяжении времени до миллисекунд. Такая зависимость позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на большое время жизни экситонов в непрямозонных КТ, квазиравновесная заселенность экситонных состояний не достигается. Для объяснения немонотонности динамики поляризации необходимо учитывать спиновую релаксацию носителей заряда между светлыми и темными состояниями экситона. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00022.

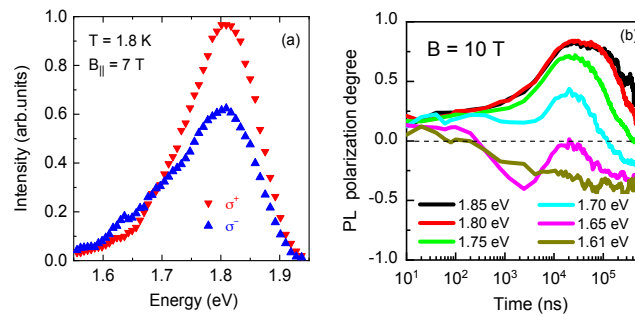


Рис. 1: (a) ФЛ в различных циркулярных поляризациях в продольном магнитном поле; (b) Спектральная зависимость динамики наведенной полем циркулярной поляризации ФЛ.

Оптическая спектроскопия возбужденной лафлиновской жидкости

Л.В. Кулик

¹*Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка, Московская обл.,
142432, Россия*

**email: kulik@issp.ac.ru*

В трехмерных электронных системах статистика квазичастиц может быть либо фермионной, либо бозонной. В двумерной электронной системе, помещенной в магнитное поле, ситуация со статистикой квазичастиц кардинально изменяется. Становятся возможны самые различные энионные статистики в промежутке от бозонной до фермионной. Экспериментальные свидетельства того, что квазичастицы в двумерных электронных системах являются энионами, были продемонстрированы недавно. Показано, что в лафлиновской жидкости на факторе заполнения электронов $1/3$ заряженные квазичастицы ведут себя, как энионы [1,2]. Учитывая то, что лафлиновская жидкость является диэлектриком, ее непосредственное использование для прикладных задач возможно посредством создания плотных ансамблей нейтральных возбуждений. Теоретически, удастся выделить низкоэнергетическую ветвь нейтральных возбуждений при нулевом импульсе - ветвь хиральных гравитонов с орбитальным моментом 2 [3,4]. Естественно, что с помощью дипольно-разрешенных оптических переходов создать подобные возбуждения невозможно. В представленной работе описывается экспериментальный метод формирования плотных ансамблей не самих хиральных гравитонов, а их компаньонов с единичным спином [5]. Оказалось, что именно эти возбуждения, а не хиральные гравитоны, представляют наибольший интерес для экспериментальных исследований, будучи нижайшими по энергии возбуждениями лафлиновской жидкости [5,6]. Разработан метод измерения времени жизни этих возбуждений. Времена жизни достигают сотен секунд, что позволяет создавать новые квазиравновесные материальные системы - лафлиновские растворы возбуждений контролируемой плотности. Оптическими методами исследованы свойства лафлиновских растворов.

Список литературы

- [1] H. Bartolomei, M. Kumar, R. Bisognin, A. Marguerite, J.-M. Berroir, E. Bocquillon, B. Placais, A. Cavanna, Q. Dong, U. Gennser, Y. Jin, and G. Feve, *Science* **368**, 173 (2020).
- [2] J. Nakamura, S. Liang, G. C. Gardner, and M. J. Manfra, *Nat. Phys.* **16**, 931 (2020).
- [3] S.-F. Liou, F. D.M. Haldane, K. Yang, and E. H. Rezayi, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 146801 (2019).
- [4] J. Liang, Z. Liu, Z. Yang, Y. Huang, U. Wurstbauer, C. R. Dean, K.W. West, L. N. Pfeiffer, L. Du, and A. Pinczuk, *Nature* **628**, 78 (2024).
- [5] L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, L. I. Musina, E. I. Belozеров, A. B. Van'kov, O. V. Volkov, A. A. Zagitova, I. V. Kukushkin, and V. Y. Umansky, *Nat. Commun.* **12**, 6477 (2021).
- [6] L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, A. V. Larionov, A. A. Zagitova, and I. V. Kukushkin, *Appl. Phys. Lett.* **123**, 083101 (2023).

Полупроводниковые и мультищелочные фотокатоды: зонная структура и механизмы эмиссии электронов

**В.Л. Альперович,^{1,2,*} С.А. Рожков,^{1,2} В.В. Бакин,¹ В.С. Русецкий,¹
Д.А. Кустов,¹ В.А. Голяшов,^{1,2} Г.Э. Шайблер,^{1,2,3} О.Е. Терещенко^{1,2}**

¹*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржасанова, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

³*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

*email: alper@isp.nsc.ru

Полупроводниковые фотокатоды, активированные до состояния с отрицательным эффективным электронным сродством (ОЭС), такие как p-GaAs(Cs,O), используются в приборах и в качестве источников спин-поляризованных электронов благодаря высокой квантовой эффективности, а также явлению оптической ориентации [1]. Мультищелочные фотокатоды Na₂KSb(Cs,Sb), состоящие из поликристаллического активного слоя Na₂KSb толщиной 100 – 200 нм, нанесенного на стеклянную подложку, и тонкого (~ 1 нм) активирующего (Cs,Sb) слоя, уступают полупроводниковым в квантовой эффективности, зато отличаются простотой изготовления и большей стабильностью [2]. В работе [3] обнаружены оптическая ориентация и эмиссия спин-поляризованных электронов из мультищелочного фотокатода Na₂KSb(Cs,Sb). В [4] установлено, что из такого фотокатода фотоэлектроны эмитируются преимущественно по нормали к поверхности, в отличие от GaAs(Cs,O)-фотокатода, из которого эмиссия идёт в широкий телесный угол благодаря диффузному рассеянию электронов в активирующем (Cs,O) покрытии. Эти неожиданные и практически значимые результаты свидетельствуют о том, что в отношении спиновой поляризации и углового распределения эмитированных электронов, поликристаллические мультищелочные фотокатоды обладают преимуществом перед структурно совершенными монокристаллическими фотокатодами на основе GaAs(Cs,O). Данный доклад посвящен выяснению и обсуждению возможных причин этого преимущества.

В работе экспериментально изучены спектры поглощения, фотолюминесценции и квантового выхода фотоэмиссии мультищелочных и полупроводниковых фотокатодов, а также распределения эмитированных электронов по продольной компоненте энергии в диапазоне температур 80-300 К. Измерения выполнялись в компактных вакуумных диодах, состоящих из Na₂KSb(Cs,Sb) или p-GaAs(Cs,O) фотокатодов, а также металлических или полупроводниковых анодов [3,4]. Результаты позволили сопоставить механизмы фотоэмиссии из мультищелочных Na₂KSb(Cs,Sb) и полупроводниковых p-GaAs(Cs,O) ОЭС фотокатодов и, тем самым, разрешить имеющиеся в литературе противоречия. Фотоэмиссия электронов преимущественно вдоль нормали к поверхности свидетельствует об одинаковой ориентации и атомной гладкости кристаллитов Na₂KSb, а также о сравнительно слабом рассеянии электронов в упорядоченном активирующем (Cs,Sb) покрытии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда 23-72-30003, <https://rscf.ru/project/23-72-30003/>.

Список литературы

- [1] H.-J. Drouhin, C. Hermann and G. Lampel, Phys. Rev. B **31**, 3872 (1985).
- [2] P. Musumeci et al., Nuclear Inst. Methods in Phys. Research A **907**, 209 (2018).
- [3] V. S. Rusetsky et al., Phys. Rev. Lett. **129**, 166802 (2022).
- [4] S. A. Rozhkov et al., Phys. Rev. Applied **22**, 024008 (2024).

Фононный механизм аномального эффекта Холла в $p_x + ip_y$ сверхпроводнике

М.В. Боев,^{1,*} М.М. Махмудиан,¹ Д.С. Елисеев¹

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

*email: boevm@isp.nsc.ru

Сверхпроводящие свойства рутената стронция, Sr_2RuO_4 , были экспериментально установлены в конце 20-го века, однако, активные исследования данного материала продолжаются и в настоящее время. Данный сверхпроводник принадлежит к классу сверхпроводников с p -типом спаривания электронов, что означает нарушение инвариантности параметра порядка относительно обращения времени. В указанном материале экспериментально наблюдается полярный эффект Керра – явление, тесно связанное с аномальным эффектом Холла: угол поворота плоскости поляризации вторичного излучения прямо пропорционален недиагональной компоненте тензора проводимости. Поэтому полное теоретическое описание аномального эффекта Холла имеет непосредственное отношение к достижению глубокого понимания физики полярного эффекта Керра в сверхпроводнике $p_x + ip_y$ -типа. До настоящего времени теоретическое описание аномального эффекта Холла в сверхпроводниках $p_x + ip_y$ -типа опирается на анализ механизмов примесного рассеяния. При этом вопрос о фононном вкладе в поперечную проводимость остается неизученным и актуальным.

Рассеяние электронов на фононах, строго говоря, является неупругим процессом, что значительно усложняет теоретическое описание физических явлений, обусловленных взаимодействием электронов с колебаниями кристаллической решетки. В случае металлов и полупроводников, исследуемых при достаточно высокой температуре, данную трудность можно обойти, полагая процессы с участием фононов квазиупругими. Однако для сверхпроводников при температурах ниже критической такое приближение оказывается неприменимым. В то же время, сверхпроводимость в материалах с триплетным типом спаривания крайне чувствительна к беспорядку и возможна лишь в чистом пределе, в котором длина свободного пробега электронов превышает длину когерентности сверхпроводника. Это позволяет при вычислении отклика $p_x + ip_y$ -сверхпроводника на внешние поля, медленно меняющиеся во времени и пространстве, ограничиться квазиклассическим приближением и значительно упростить теоретическое описание эффекта. В данном подходе нахождение асимметричной части интеграла столкновений являлось основной задачей и было выполнено с помощью методов неравновесной диаграммной техники.

При низкой температуре в фононной подсистеме представлены лишь длинноволновые равновесные колебания, слабо проявляющие себя в процессах рассеяния квазичастиц сверхпроводника. Поэтому лидирующие процессы рассеяния квазичастиц сопровождаются испусканием фононов. При этом возможны два типа процессов: энергетическая релаксация электрон- и дырочноподобных квазичастиц и их взаимная аннигиляция, то есть связывание пары электронов в куперовскую пару. В настоящей работе установлено, что вблизи критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние процессы второго типа играют основную роль в фононном механизме поперечного отклика $p_x + ip_y$ -сверхпроводника. Кроме того показано, что фононный вклад в холловскую проводимость $p_x + ip_y$ -сверхпроводника существенно зависит от температуры и резко возрастает при приближении к точке фазового перехода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00174, <https://rscf.ru/project/24-22-00174/>.

Экситоны и трионы в анизотропных бислоях ван-дер-ваальсового антиферромагнетика CrSBr

М.А. Семина,^{1,*} М.М. Глазов¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: semina@mail.ioffe.ru

Слоистые структуры с ван-дер-ваальсовыми связями между слоями привлекают особый интерес исследователей. Недавно список таких систем пополнился магнитным полупроводником CrSBr, в котором внутри слоя реализуется ферромагнитное упорядочение спинов, а спины в соседних слоях направлены антипараллельно [1]. Интересной особенностью CrSBr является подавленное межслоевое туннелирование носителей заряда и сильная анизотропия эффективных масс носителей заряда в плоскости слоя: для электронов отношение масс вдоль кристаллических осей составляет примерно 50, а для дырок – 6 [2].

Оптический отклик бислоев CrSBr определяется экситонами, которые, как показывает предварительный анализ, могут быть описаны в рамках модели Ванье-Мотта. При наличии легирования формируются заряженные экситоны – трионы [3]. В работе представлены результаты теоретического исследования экситонов и трионов в двухслойных структурах с сильно анизотропной эффективной массой. Для описания взаимодействия между носителями заряда использовались как кулоновский потенциал, так и потенциал, самосогласованно учитывающий диэлектрическую экранировку. Расчеты выполнялись как вариационным методом, так и прямой численной диагонализацией гамильтониана. При разных параметрах анизотропии эффективной массы получены зависимости энергий связи пространственно-непрямых экситонов и трионов от межслоевого расстояния. Получены асимптотики для энергии связи и степени анизотропии волновой функции для прямого экситона. С увеличением анизотропии эффективных масс энергии связи пространственно-непрямых экситонов и трионов становятся более резкими функциями межслоевого расстояния [4]. Показано, что, хотя квазиодномерная модель достаточно хорошо подходит для описания зависимости энергии связи экситонов от межслоевого расстояния в случае сильной анизотропии эффективной массы, в случае трионов она дает нереалистично быстрое спадание энергии связи с ростом расстояния между слоями.

Для двухслойной структуры с параметрами CrSBr рассчитаны зависимости энергий связи пространственно-непрямых экситонов и трионов от межслоевого расстояния [4], которые вполне адекватно описывает экспериментальные данные.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-12-00142.

Список литературы

- [1] N. P. Wilson, K. Lee, J. Cenker, et. al., Nat. Mater. **20**, 1657 (2021).
- [2] J. Klein, B. Pingault, M. Florian, et. al., ACS Nano **17**, 6, 5316 (2023).
- [3] F. Tabataba-Vakili, et al., Nat. Communs. **15**, 4735 (2024).
- [4] M. A. Semina, F. Tabataba-Vakili, A. Rupp, et. al., arXiv:2411.15493 (2024).

Экситонный изолятор в ван-дер-ваальсовых гетероструктурах

М.М. Глазов,^{1,*} A. Imamoglu²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²ETH Zürich, Zürich, Switzerland

*email: glazov@coherent.ioffe.ru

Если ширина запрещенной зоны полупроводника E_g и энергия связи экситона E_B сопоставимы, то кулоновское взаимодействие не является малым возмущением, а приводит к перестройке зонной структуры. В частности, при $E_B \geq E_g$, когда полупроводник оказывается неустойчивым к формированию экситонов, в системе происходит фазовый переход, а энергетический спектр перенормируется таким образом, чтобы неустойчивость пропала – в системе формируется экситонный изолятор [1,2]. Природа и тип фазового перехода обсуждались в научной литературе, и во многих важных случаях данный фазовый переход оказывается фазовым переходом I-ого рода [3]. Переход в состояние экситонного изолятора обсуждался и для двумерных систем в связи с возможностью реализации сверхтекучего состояния электрон-дырочных пар, см., например, [4].

Вторая волна интереса к экситонному изолятору в двумерии возникла недавно в связи с развитием физики ван-дер-ваальсовых гетероструктур [5]. В таких системах энергия связи экситона достигает сотен мэВ, а путем подбора материалов и внешних условий (электрического поля, приложенного перпендикулярно слоям, и упругих деформаций) можно добиться схожих значений ширины запрещенной зоны, что позволяет выполнить критерий $E_B \geq E_g$.

В нашей работе построена последовательная теория экситонного изолятора в ван-дер-ваальсовых гетероструктурах с учетом прямого и дальнего обменного взаимодействия между электроном и дыркой. Показано, что если зона проводимости и валентная зона обладают разной симметрией, то фазовый переход является переходом II-ого рода. Полученное состояние во многом аналогично экситонному конденсату. Получен перенормированный одночастичный спектр и спектр коллективных возбуждений в системе. Показано, что в случае, когда низшим по энергии является оптически-активное экситонное состояние, электрон-дырочное обменное взаимодействие подавляет флуктуации фазы конденсата и стабилизирует его. Предлагаемая система является примером двумерной системы, где возможен фазовый переход второго рода с нарушением непрерывной симметрии.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 23-12-00142.

Список литературы

- [1] Л. В. Келдыш, Ю. В. Копаев, ФТТ **6**, 2791 (1964).
- [2] D. Jérôme, T. M. Rice, W. Kohn, Phys. Rev. **158**, 462 (1967).
- [3] Р. Р. Гусейнов, Л. В. Келдыш, Краткие сообщения по физике **7**, 58 (1971).
- [4] Ю. Е. Лозовик, В. И. Юдсон, ЖЭТФ **71**, 738 (1976).
- [5] L. Ma, P. X. Nguyen, et al., Nature **598**, 585 (2021).

Ферромагнетизм в сильно компенсированном (Ga,Mn)As

И.А. Кокурин,^{1,2*} Н.С. Аверкиев¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия

²Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия

*email: kokurinia@mail.ru

В настоящий момент общепринятой считается точка зрения, что в разбавленных магнитных полупроводниках (РМП), таких как (Ga,Mn)As, ферромагнетизм опосредован свободными носителями (дырками) в духе РККИ-механизма косвенного обмена [1]. Такое описание не применимо к сильно компенсированным диэлектрическим образцам, которые также представляют интерес, например, при создании гибридных структур сверхпроводник/ферромагнетик [2].

Недавно нами было показано, что в компенсированном (Ga,Mn)As, когда косвенный обмен опосредован локализованными носителями (дырками акцепторов Mn_{Ga}^0), реализуется два конкурирующих механизма парного выстраивания [3] (ферро- и антиферромагнитным типа). Относительный вклад этих механизмов определяется степенью компенсации. Ярко выраженного ферромагнетизма в такой системе следует ожидать при степени компенсации близкой, или незначительно превышающей 1/2: в этом случае на каждую пару магнитных ионов приходится один носитель заряда, и парные взаимодействия являются ферромагнитными. Данное утверждение находится в согласии с представлением о выраженном ферромагнетизме при половинном заполнении примесной зоны [4] и экспериментальными данными по (Ga,Mn)As в диэлектрической фазе.

Обсуждается возможность наблюдения в (Ga,Mn)As фотоферромагнитного (ФФМ) эффекта. Обычно, данный эффект рассматривается в системах с РККИ-взаимодействием. В этом случае усиление ферромагнетизма связывают с увеличением концентрации свободных носителей (при межзонном фотовозбуждении), ответственных за косвенный обмен [5].

Нами предсказан новый механизм ФФМ-эффекта применительно к РМП в диэлектрической фазе. Предлагается использовать фотовозбуждение с энергией кванта меньшей ширины запрещенной зоны, обеспечивающее оптический переход фотонейтрализации магнитных акцепторов Mn_{Ga}^- [6]. Это позволит изменять эффективную степень компенсации, а значит управлять магнитными свойствами РМП посредством изменения относительных вкладов механизмов парного взаимодействия с ферро- и антиферромагнитным выстраиванием.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 25-12-00093).

Список литературы

- [1] T. Dietl and H. Ohno, Rev. Mod. Phys., **86**, 187 (2014).
- [2] J. Linder and J. W. Robinson, Nat. Phys. **11**, 307 (2015).
- [3] I.A. Kokurin, N.S. Averkiev, Phys. Rev. B **109**, 214415 (2024).
- [4] M. Dobrowolska, K. Tivakornsasithorn, X. Liu, J.K. Furdyna, M. Berciu, K.M. Yu, and W. Walukiewicz, Nat. Mater. **11**, 444 (2012).
- [5] Б.В. Карпенко, А.А. Бердышев, ФТТ **5**, 3397 (1963).
- [6] P.V. Petrov, I.A. Kokurin, Yu.L. Ivanov, N.S. Averkiev, R.P. Campion, B.L. Gallagher, P.M. Koenraad, and A.Yu. Silov, Phys. Rev. B **94**, 085308 (2016).

Генерация фотоиндуцированных токовых состояний вокруг примесных центров в двумерном электронном газе

А.С.Мельников^{1,2,*}, А.А.Копасов^{2,3}, А.А.Беспалов²

¹ МФТИ, Долгопрудный, Московская обл., 141701, Россия

² Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, ГСП-105, Россия

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, 119049, Россия

*email: melnikov@ipm.sci-nnov.ru

В работе решена задача о генерации токового состояния (тока на нулевой частоте) вокруг примесного центра в двумерном электронном газе в поле циркулярно поляризованной электромагнитной волны, падающей на образец. Расчеты выполнены во втором порядке теории возмущений по полю электромагнитной волны в рамках стандартного уравнения Шредингера, которое включает потенциал примесного центра малого радиуса. Полученные результаты справедливы для произвольной амплитуды рассеивающего потенциала примеси (как в борновском приближении так и за его рамками). Возникающий электрический ток на больших расстояниях от примеси осциллирует на масштабе фермиевской длины волны и спадает с ростом расстояния r до примесного центра как $1/r^2$. Данный ток индуцирует постоянное магнитное поле, локализованное вблизи примесного центра. Рассматривая систему случайных примесей с заданной концентрацией n_{imp} мы получаем среднее постоянное магнитное поле, индуцированное падающей электромагнитной волной:

$$\bar{B}_z \sim \mu_B \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \frac{E_0^2}{\hbar \omega} \frac{n_{imp}}{n_e} \bar{F}. \quad (1)$$

Здесь $\mu_B = e\hbar/2Mc$ - магнетон Бора, M - эффективная масса, $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 k_F n_e / M}$, n_e - концентрация электронов, ω - частота электромагнитной волны, E_0 амплитуда электрического поля и $\bar{F}$ - сечение рассеяния электрона на примеси, нормированное на фермиевскую длину волны ($\sim k_F^{-1}$).

Данное поле не связано с краевыми фотоиндуцированными токами [1] и вследствие этого не спадает в центре образца с увеличением его размеров. Полученные результаты обсуждаются в контексте экспериментов по наблюдению фотоиндуцированных эффектов Холла и Фарадея и иных возможных теоретических сценариев данных явлений [2,3].

Работа выполнена при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-010 от 28.02.2025 г.).

Список литературы

- [1] R. Hertel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **303**, L1–L4 (2006).
- [2] M. V. Durnev, Phys. Rev. B **104**, 085306 (2021).
- [3] M. V. Durnev, Phys. Rev. B **108**, 125418 (2023).

Спиновое расщепление электронов проводимости в металлических коллинеарных антиферромагнетиках

В.А. Зюзин,¹

¹Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

*email: zyuzin@itp.ac.ru

Мы рассмотрим металлические коллинеарные антиферромагнетики, в которых электроны проводимости приобретают спиновое расщепление, спин-импульсную связь и аналог Зеемановского расщепления, за счёт взаимодействия с Неелевским порядком [1,2,3]. Спиновое расщепление электронов проводимости может быть как антиферромагнитным так и ферромагнитным в зависимости от симметрии системы. Механизм возникновения такого расщепления заключается в комбинации взаимодействия электронов проводимости с Неелевским порядком и анизотропии электронных прыжков в подрешётках. Поэтому магнетизм электронов проводимости является вторичным по отношению к основополагающему Неелевскому порядку. Мы рассмотрим несколько примеров двумерных решёток, в которых электроны проводимости обладают таким спиновым расщеплением. Будут обсуждаться аномальный эффект Холла, аномальный спиновый эффект Холла, д-волновые эффект Холла и линейное магнитосопротивление, как примеры эффектов, которые присущи таким антиферромагнетикам.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИТФ им Л.Д. Ландау РАН. Доклад основан на работах автора [4,5,6].

Список литературы

- [1] S. Hayami, Y. Yanagi, and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 123702 (2019). *Momentum-Dependent Spin Splitting by Collinear Antiferromagnetic Ordering*
- [2] L. Smejkal, R. Gonzalez-Hernandez, T. Jungwirth, and J. Sinova, Science Advances **6**, eaaz8809 (2020). *Crystal time-reversal symmetry breaking and spontaneous Hall effect in collinear antiferromagnets.*
- [3] L.-D. Yuan, Z. Wang, J.-W. Luo, E.I. Rashba, A. Zunger, Phys. Rev. B **102**, 144422 (2020). *Giant momentum-dependent spin splitting in centrosymmetric low-Z antiferromagnets*
- [4] D.L. Vorobev, V.A. Zyuzin *d-Wave Hall effect and linear magnetoelectricity in metallic collinear antiferromagnets*, Phys. Rev. B **109**, L180411 (2024).
- [5] V.A. Zyuzin, *Anomalous Hall effect in metallic collinear antiferromagnets with charge-density wave order*, Phys. Rev. B **110**, 174426 (2024).
- [6] V.A. Zyuzin, *Metallic collinear antiferromagnets with mirror-symmetric and asymmetric spin-splittings*, arXiv:2412.13009.

Транспортные свойства одномерной сверхпроводящей проволоки, подверженной влиянию диссипации

С.В. Аксенов,^{1,2,*} М.С. Шустин^{1,2}, И.С. Бурмистров^{1,3}

¹Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

²Институт физики им. Л.В. Киренского РАН, Красноярск, Россия

³НИУ Высшая школа экономики, Москва, Россия

*email: asv@itp.ac.ru

Развитие технологий создания систем холодных атомов, квантовой оптики, а также прогресс в области изучения взаимодействия света с веществом актуализировали проблемы физики открытых твердотельных структур. Базовым сценарием здесь является наличие системы, которая управляется внешним полем и связана с окружающей средой (резервуаром), индуцирующей диссипативную динамику [1,2]. Существенно, что возникающее в итоге неравновесное стационарное состояние может быть не достижимым в рамках унитарной эволюции гамильтониана.

В данной работе мы рассмотрели сверхпроводящую проволоку из N узлов, которая описывается обобщенной моделью Китаева (перескок бесспиновых электронов и их р-волновое спаривание реализуются между произвольными соседями) и взаимодействует с N_C однозонными нормальными ферми-контактами и N_B резервуарами. Последние характеризуются линейными операторами Линдблада. В рамках квантово-полевого подхода получено выражение, описывающее электронный ток в произвольном контакте. Показано, что при $N_C = 1$ (контакт связан с крайним узлом проволоки) и $N_B > 0$ кондактанс контакта в режиме линейного отклика и низких температур квантуется, если неравновесное стационарное состояние вырождено. В случае $N = 2$ изучены особенности отклика топологически неустойчивого майорановского состояния (poor man's Majorana bound state) [3,4].

Работа выполнена в рамках госзадания ИТФ им Л. Д. Ландау РАН. Авторы благодарят фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» за персональную поддержку.

Список литературы

- [1] L. M. Sieberer, M. Buchhold, and S. Diehl, Rep. Prog. Phys. **79**, 096001 (2016).
- [2] F. Thompson and A. Kamenev, Ann. Phys. (N.Y.) **455**, 169385 (2023).
- [3] T. Dvir, G. Wang, N. van Loo, et al., Nature **614**, 445 (2023).
- [4] S. L. D. ten Haaf, Q. Wang, A. M. Bozkurt, et al., Nature **630**, 329 (2024).

Стимулированное понижение частоты однофотонного излучения квантовой точки в микрорезонаторе

Крайнов И.В., Рахлин М.В., Веретенников А.И., Шубина Т.В.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

*email: igor.krainov@mail.ru

Источник одиночных фотонов – ключевой элемент в ряде систем квантовых коммуникаций и квантовых вычислений – представляет собой брэгговский микрорезонатор с квантовой точкой (КТ) внутри центральной полости. Одиночные фотоны испускаются в результате спонтанных оптических переходов между квантовыми уровнями в КТ. Эффективность источника определяется в первую очередь совпадением их энергии с энергией основной моды резонатора, имеющего высокую добротность. Это не всегда реализуется, поскольку эпитаксиальные КТ характеризуются большим разбросом энергий, в отличие от стабильных мод резонаторов. Кроме того, хорошие результаты получаются только на КТ InAs/GaAs, излучающих около 900 нм. Результаты в диапазонах, соответствующих телекоммуникационным частотам, не столь впечатляющие. Альтернативным вариантом является использование нелинейных эффектов, таких как спонтанное параметрическое понижение частоты и спонтанное четырехволновое смешение в средах с восприимчивостями 2-го и 3-го порядков соответственно [1]. Для таких источников характерно случайное возникновение пар фотонов и низкая эффективность, что отчасти компенсируется применением внешних резонаторных структур, но приводит к увеличению размеров. В данной работе рассматривается возможность реализации нелинейного оптического процесса рекомбинации в системе КТ-микрорезонатор с использованием дополнительного стимулирующего лазера. Эпитаксиальные точки планируется изготавливать по технологии, хорошо отработанной для КТ с длиной волны излучения 900 нм. Возбуждение КТ осуществляется обычным способом, например, π -импульсом. Резонатор же рассчитан на длину волны нужного диапазона, к примеру 1.55 мкм. Таким образом, частота основной оптической моды в микрорезонаторе, ω_0 будет существенно отличаться от частоты ω_{QD} перехода в КТ. Стимулирующий лазер имеет частоту ω_1 , соответствующую разнице этих двух частот. Воздействие сильного электромагнитного поля лазерного излучения с частотой ω_1 стимулирует нелинейный процесс рекомбинации второго порядка. В этом случае экситон сначала переходит в возбужденное состояние (электрон + легкая дырка), а затем рекомбинирует через виртуальный уровень с конечным испусканием фотона с частотой, точно соответствующей частоте моды резонатора ω_0 . Ключевым преимуществом данной схемы является возможность подстройки энергии нелинейного перехода в КТ таким образом, чтобы она совпадала с энергией моды резонатора. Это достигается изменением частоты стимулирующего лазера, удовлетворяющей закону сохранения энергии $\omega_{QD} = \omega_1 + \omega_0$. Проведено модельное описание генерации одиночных фотонов в резонаторной моде для двух случаев: когда начальным состоянием процесса является светлый экситон X_{hh} и темный экситон X_D . Оценки эффективности нелинейного процесса показывают [2], что в идеальном случае можно достичь частоты генерации фотонов, приближающейся к мегагерцу, при возбуждающей мощности лазера ~ 10 мВт.

Список литературы

- [1] H. Wang, Q. Zeng, H. Ma, Z. Yuan, Adv. Devices Instrum. **5**, 0032 (2024).
- [2] I.V. Krainov, M.V. Rakhlin, A.I. Veretennikov, T.V. Shubina, Optics Lett., accepted

Плазменные колебания в латерально ограниченных анизотропных двумерных электронных системах

Д.А. Родионов,^{1,2,*} И.В. Загороднев¹

¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

²МФТИ, Долгопрудный, Россия

*email: rodionov.da@phystech.edu

В работе теоретически исследованы плазменные колебания в латерально ограниченных анизотропных двумерных электронных системах, поверхность Ферми которых является эллипсом. К таким системам относятся некоторые монослойные кристаллы атомов V группы (фосфорен), монослои некоторых ди- и трихалькогенидов переходных металлов, напряженные квантовые ямы AlAs/AlGaAs и другие [1,2]. Под двумерной электронной системой на расстоянии d расположен идеально проводящий плоский металлический электрод. Рассмотрен предел сильного экранирования, когда расстояние между двумерной системой и электродом много меньше характерного планарного размера системы и длины волны плазменных колебаний.

Показано, что вывод дисперсионного уравнения на частоту ω плазменных колебаний достаточно провести в квазистатическом пределе. Учет же электромагнитного запаздывания может быть произведен «укорочением» диагональных элементов тензора удельного сопротивления на величину $i4\pi d\omega/c^2$ (в системе единиц СГС), где c – скорость света в вакууме. При низких частотах, т.е. таких, что основной вклад в проводимость вносят внутризонные переходы, это условие эквивалентно увеличению эффективных масс электрона m_1 и m_2 на величину $\delta = 4\pi d n_s e^2 / c^2$, где n_s , $-e$ – двумерная концентрация и заряд электронов. Кроме того, при низких частотах анизотропная система растяжением по одной главной оси в $\sqrt{m_1/m_2}$ раз и сжатием во столько же раз по другой оси может быть сведена к изотропной системе с эффективной массой электрона $\sqrt{m_1 m_2}$.

Так, к примеру, для анизотропной двумерной электронной системы в форме диска, представляющей интерес для эксперимента [2], эквивалентной изотропной системой является эллипс. Аналитическое решение этой задачи выражается через функции Маттье. Установлена зависимость частоты плазменных колебаний от отношения эффективных масс m_1/m_2 . Показано, что из-за нарушения круговой симметрии происходит снятие вырождения по знаку орбитального числа плазменной моды. С ростом роли электромагнитного запаздывания добавка δm возрастает, что уменьшает отношение «увеличенных» масс и может привести к смене порядка следования мод по частоте друг за другом.

Если в анизотропной системе становятся важны межзонные переходы, то существует область частот, где мнимые части диагональных элементов тензора проводимости имеют разные знаки, что приводит к возникновению гиперболических плазмонов [3]. На примере сильно экранированной двумерной электронной системы в форме полосы изучены спектры «объемных» и краевых гиперболических плазмонов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-22-00450.

Список литературы

- [1] A. N. Rudenko, M. I. Katsnelson, 2D Materials **11**, 042002 (2024).
- [2] A. R. Khisameeva, V. M. Muravev, I. V. Kukushkin, Applied Physics Letters **117**, 093102 (2020).
- [3] A. Nemilentsau, T. Low, G. Hanson, Physical Review Letters **116**, 066804 (2016).

Топологические возбуждения в экситон-поляритонной системе, возбуждаемой резонансным светом

С. С. Гаврилов

Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка, Россия

email: gavr_ss@issp.ac.ru

Рассматриваются когерентные состояния слабо взаимодействующих бозонов во внешнем поле на примере двумерной экситон-поляритонной системы, возбуждаемой резонансным светом. Динамика этой системы описывается уравнениями Гросса-Питаевского с диссипацией и внешним источником [1]. Наличие источника возбуждения нарушает фазовую симметрию теории, что приводит, например, к запрету на появление квантованных вихрей (фаза параметра порядка фактически задается извне). Однако аналогичная спинорная (двухкомпонентная) система, имеющая два параметра порядка $\psi_{\pm}$, допускает солитонные и вихревые решения даже в случае строгой пространственной однородности и спиновой симметрии задачи, которые нарушаются спонтанно в соответствии со сценарием Киббла-Зурека [2]. Решения при этом могут обладать остаточной слабой симметрией вида $\psi_+ + \psi_- = \psi_+^* + \psi_-^*$, при которой теория инвариантна относительно глобального преобразования $\psi_{\pm} \mapsto \psi_{\pm} e^{i\chi}$ для всякого малого χ . Данное обстоятельство эквивалентно наличию сохраняющегося нётеровского тока, т. е. выполняется обычное для двухкомпонентных бозе-эйнштейновских конденсатов уравнение непрерывности, которое не содержит внешних источников. В итоге система, возбуждаемая сильным внешним полем, обнаруживает топологические дефекты, характерные для свободно эволюционирующих конденсатов. Некоторые такие решения ранее были исследованы численно [3]. В докладе будут рассмотрены 1) фазовые домены, на границе которых изменяется разность фаз спиновых компонент и 2) молекулы “полувихрей”, находящиеся на доменной границе. Аналогичные фазовые домены возникают в двухкомпонентных атомных конденсатах или сверхпроводниках [4, 5], где отсутствуют энергетические предпосылки для пространственной сегрегации компонент. Как правило, фазовые домены неустойчивы; ключевые механизмы распада доменной границы обсуждаются в работе [6]. Особенность поляритонной системы во внешнем поле состоит в том, что в спектре элементарных возбуждений ([7]) существует энергетическая щель, благодаря которой решения с доменной границей и находящимися на ней вихрями могут быть асимптотически устойчивыми. В связи с этим открываются новые возможности крупномасштабной самоорганизации бозе-конденсатов.

Работа поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

Список литературы

- [1] С. С. Гаврилов, УФН **190**, 137 (2020)
- [2] T. W. B. Kibble, Phys. Rep. **67**, 183 (1980); W. H. Zurek, Nature **317**, 505 (1985)
- [3] S. S. Gavrilov, Phys. Rev. B **102**, 104307 (2020)
- [4] D. T. Son and M. A. Stepanov, Phys. Rev. A **65**, 063621 (2002)
- [5] Y. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **88**, 017002 (2001)
- [6] A. Gallemi, L. P. Pitaevskii, S. Stringari, A. Recati, Phys. Rev. A **100**, 023607 (2019)
- [7] S. S. Gavrilov, Phys. Rev. B **106**, 045304 (2022)

Многочастичные сильно коррелированные квантовые состояния 2D электронов в умеренном магнитном поле

П. С. Алексеев*, А. П. Дмитриев

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: pavel.alekseev@mail.ioffe.ru

В последние годы интенсивно изучается гидродинамический режим транспорта 2D электронов в сверхчистых наноструктурах на основе графена, квантовых ям и других материалов. Несмотря на успехи теорий на основе уравнений Навье-Стокса для описания эффектов гидродинамического транспорта, остаются открытыми вопросы о микроскопической структуре 2D электронной жидкости, о причинах её формирования, особенно, в пределе низких температур, когда ee -рассеяние подавлено.

Мы выполнили микроскопическое построение многочастичных коррелированных состояний 2D электронов в умеренном магнитном поле в пределе нулевой температуры. В качестве базисных функций невзаимодействующих электронов взяты одночастичные функции Ландау на верхнем, частично заполненном, уровне Ландау n_F , $n_F \gg 1$, а также, на двух примыкающих к нему уровнях $n_F \pm 1$, полностью пустом и полностью заполненном. Рассчитаны матричные элементы оператора ee -взаимодействия; они оказались осциллирующими и знакопеременными функциями 1D канонических импульсов k взаимодействующих электронов. Построено преобразование Боголюбова исходных одночастичных состояний, диагонализующее гамильтониан: многочастичные состояния есть линейные комбинации пар одночастичных состояний с фиксированным суммарным каноническим импульсом $k_1 + k_2$. Полученные состояния отчасти похожи на многочастичные состояния электронов в модели сверхпроводника БКШ-Боголюбова, где фиксируется суммарный импульс пар скоррелированных электронов. Составлены и решены уравнения на параметры преобразования и на химический потенциал, который здесь критически зависит от силы взаимодействия и фактора заполнения уровня n_F . Квазичастичные возбуждения одного типа имеют энергии $\varepsilon_{\alpha,k}$, близкие к циклотронной энергии $\hbar\omega_c$, при этом разброс этих энергий в зависимости от k мал, порядка произведения параметра межэлектронного взаимодействия r_s , $r_s \ll 1$, на $\hbar\omega_c$. Квазичастицы другого типа имеют малые величины как щели (минимальная величины $\varepsilon_{\alpha,k}$), так и разброса $\varepsilon_{\alpha,k}$: обе величины порядка $r_s\hbar\omega_c$. Показано, что первые квазичастицы переносят как поток частиц, так и поток импульса, в то время как вторые переносят преимущественно поток импульса.

Оценка величины выигрыша энергии построенного коррелированного основного состояния сравнительно с энергией основного состояния невзаимодействующих электронов показывает, что возможно сосуществование изученных нами многочастичных состояний и ранее изученных многочастичных состояний в этой системе типа волна плотности [1].

Мы приводим аргументы в пользу того, что построенные многочастичные состояния могут в значительной степени сохранить свой вид и свойства при наличии в системе достаточно малого постоянного электрического поля и слабого беспорядка, приобретая при этом конечные времена релаксации. Это является возможным объяснением реализации гидродинамического режима транспорта электронов в пределе низких температур в чистых наноструктурах в умеренном магнитном поле.

Список литературы

- [1] A. A. Koulakov, M. M. Fogler, and B. I. Shklovskii, Phys. Rev. Lett. **76**, 499 (1996).

Поперечные плазменные волны в 2D структурах в «ультрарелятивистском» пределе

В.А. Волков

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Volkov.V.A@gmail.com

В плоскостойких структурах существует два независимых типа электромагнитных волн, продольные (ТМ-моды) и поперечные (ТЕ-моды). В полупроводниковых структурах с вырожденной 2D электронной плазмой довольно давно исследуются плазмон-поляритоны (или, просто, 2D плазмоны). Обычно они являются продольными возбуждениями. Дело в том, что в идеале поперечные плазмон-поляритоны реализуются только в случае, когда 2D электроны находятся в многослойной структуре волноводного типа. Именно поэтому учет волноведущего характера подложки, всегда присутствующей в реальных образцах, играет принципиально важную роль в построении адекватной теории поперечных плазменных волн (в отличие от продольных плазменных волн).

В работе сделана попытка построения простой аналитической теории спектра поперечных плазменных волн в 2D электронной плазме, помещенной на плоскопараллельную диэлектрическую пластину конечной толщины L и бесконечных латеральных размеров. В пределе малых L задача резко упрощается и сводится к решению эффективного уравнения Шредингера с короткодействующим потенциалом. Найдено и проанализировано выражение для закона дисперсии основной моды Фабри-Перо. Спектр параметризуется отношением некой величины v , зависящей от параметров задачи и имеющей размерность скорости, к скорости света c . Наиболее интересные результаты для спектра возникают в «ультрарелятивистском» пределе, когда $v/c > 1$. Оценки показывают, что этот предел несложно, в принципе, реализовать на опыте.

Нарушение топологической защиты в краевых состояниях 2D топологического изолятора

И.В. Крайнов,¹ Р.А. Ниязов,^{1,2,*} Д.Н. Аристов,^{1,2} В.Ю. Качоровский¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²НИИ “Курчатовский Институт” - ПИЯФ, Гатчина, Россия

*email: r.niyazov@mail.ioffe.ru

На краю 2D топологического изолятора существуют 1D геликоидальные состояния (ГС), где электроны с противоположными импульсами имеют противоположные спины. В теории эти состояния защищены топологически, что предотвращает рассеяние на немагнитном беспорядке. Однако эксперименты показывают сильное рассеяние в образцах длиной более 3 мкм, слабо зависящее от температуры, T [1].

Мы предлагаем механизм рассеяния назад, связанный с заряженными островками рядом с краем, которые захватывают электроны через туннельную связь с ГС [2]. Ключевое отличие от предыдущих работ, изучающих рассеяние назад за счет наличия островков (см., например, [3]) – отсутствие неупругих процессов в островке, что делает темп рассеяния назад почти независимым от T .

В модельной задаче об островке в виде отверстия в 2D ТИ (см. Рис. 1 (а)) в отсутствие взаимодействия вклады от траекторий электронов по (R) и против (L) часовой стрелки сокращают друг друга, так что амплитуда рассеяния назад равна нулю. При наличии взаимодействия флуктуирующий циркулярный ток в кольце, $J = g(N_R - N_L)$ (здесь $N_{R,L}$ – число правых (левых) электронов в ГС, g -сила взаимодействия) приводит к различию фаз R и L электронов при обходе островка. Это вызывает конечное рассеяние, пропорциональное $\langle (\sin J)^2 \rangle$, которое практически не зависит от T , но слабо зависит от магнитного потока, ϕ , через островок (см. Рис. 1 (b)). Результат обобщен для реальной модели диффузионного островка с множеством случайных траекторий. Показано, что классический (диффузон) и квантовый интерференционный (куперон) вклады сокращают друг друга при $g = 0$, но приводят к увеличению вероятности рассеяния назад при $g \neq 0$, пропорциональной $\ln(\tau_\phi/\tau)$, где τ_ϕ – время сбоя фазы. Поэтому зависимость от T логарифмически медленная, что согласуется с экспериментом.

Работа выполнена при поддержке РНФ № 24-62-00010.

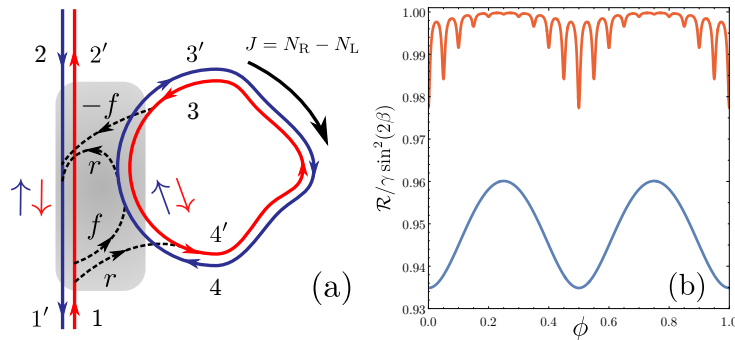


Рис. 1: (а) Островок вблизи края 2D ТИ; (б) Зависимость рассеяние назад от ϕ при разной силе туннелирования в островок.

Список литературы

- [1] E. Olshanetsky, Z. Kvon, G. Gusev, N. Mikhailov, Physica E, **147**, 115605 (2023).
- [2] I.V. Krainov, R.A. Niyazov, D.N. Aristov, V.Yu. Kachorovskii, arXiv:2410.04610 (2024).
- [3] J.I. Väyrynen, M. Goldstein, L.I. Glazman, Phys. Rev. Lett. **110**, 216402 (2013).

Граничные условия полупроводник/диэлектрик и точный учет потенциала самодействия для электрона

Я.М. Бельтюков¹, А.В. Родина,^{1,*} А.Ю. Алексеев², Ал.Л. Эфрос³

¹ФТИ и.м. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Department of Mathematics, University of Geneva, CH-1211 Genève 4, Switzerland

³Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA

*email: anna.rodina@mail.ioffe.ru

Одной из давно известных, до сих пор не решенных проблем в теории твердого тела является точный учет влияния разницы диэлектрических проницаемостей ε_1 в полупроводнике и ε_2 в диэлектрике (или вакууме) на энергетический спектр, волновые функции и физически наблюдаемые величины, такие как коэффициент прохождения электрона через барьер. Потенциал $U(z)$ для электрона в гетероструктуре полупроводник/диэлектрик (сплошные линии на рис. 1а) включает наряду с кусочно-ступенчатым потенциалом (потенциальный барьер высоты V на границе раздела $z = 0$, штриховые линии на рис. 1а) потенциал самодействия $U_{\text{self}}(z)$. Потенциал $U_{\text{self}}(z)$ пропорционален диэлектрическому контрасту $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ и имеет расхожимость $1/z$ с обеих сторон от границы, он является отталкивающим со стороны полупроводника с $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ и притягивающим со стороны диэлектрика.

Влияние потенциала $U_{\text{self}}(z)$ на уровни размерного квантования в полупроводниковой квантовой яме или квантовой точке можно учесть в рамках теории возмущений только в случае граничных условий (ГУ) Дирихле. При этом в области диэлектрика формируется дискретный спектр состояний с энергиями $E_n = V - R^*/n^2$ (оранжевые линии на рис. 1а,b), где $n = 1, 2, \dots$ и R^* — эффективная энергия Ридберга в притягивающем потенциале, и электрон не может туннелировать через границу.

Мы предлагаем самосогласованное решение уравнения Шредингера, дополненного ГУ, гарантирующими непрерывность плотности потока вероятности на границе и непрерывность волновой функции электрона. ГУ зависят от единственного параметра W , моделирующего всю микроскопическую информацию о границе, и могут быть применены для любого типа потенциала самодействия с расхожимостью вида $1/z$. Для случая одной плоской границы (рис. 1а) нами получено точное решение. Обнаружено формирование поверхностных ($E < 0$) или резонансных ($0 < E < V$) состояний с энергиями вблизи E_n . Фаза коэффициента отражения в области $0 < E < V$ (рис. 1b) и коэффициент прохождения в области $E > V$ (рис. 1c) существенно зависят от поверхностного параметра W .

Работа поддержана грантом РНФ № 23-12-00300.

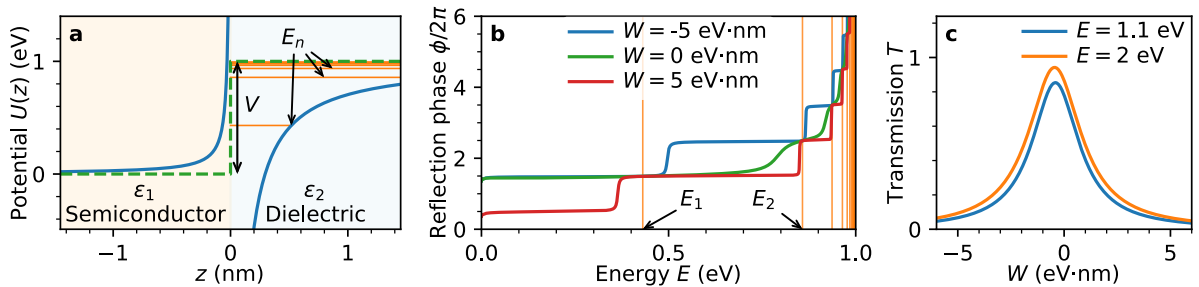


Рис. 1: (а) Потенциал для электрона; (b) фаза коэффициента отражения (при $0 < E < V$) и (c) коэффициента прохождения ($E > V$) в зависимости от поверхностного параметра W .

Стендовые доклады

Гибридные муаровые экситоны и трионы

А.С. Баймуратов,^{1,2,*}

¹*Fakultät für Physik, Munich Quantum Center, and Center for NanoScience (CeNS),
Ludwig-Maximilians-Universität München, Geschwister-Scholl-Platz 1, 80539 München,
Germany*

²*Центр инженерной физики, Сколковский институт науки и технологий,
Большой бульвар д.30, стр.1, Москва 121205, Россия*

*email: a.baimuratov@skoltech.ru

Мы сообщаем о совместных экспериментальных и теоретических исследованиях гетерослоев из дихалькогенидов переходных металлов с жёсткими муаровыми сверхрешётками, контролируемые углом скручивания [1]. Используя эффективную континуальную модель, которая сочетает туннелирование электронов между слоями с муаровыми потенциалами, мы определяем природу муаровых экситонов, а также исследуем зависимости их энергий, сил осцилляторов и Ланде g -факторов от угла скручивания [2].

Мы интерпретируем экспериментальные данные оптического отклика связанных комплексов между электронами и муаровыми экситонами в почти коллинеарных гетероструктурах. Наша работа обеспечивает фундаментальное понимание гибридных муаровых экситонов и трионов в гетерослоях $\text{MoSe}_2\text{--WS}_2$ и $\text{MoTe}_2\text{--MoSe}_2$, делая такие материалы перспективными кандидатами для оптических исследований коррелированных явлений в муаровых решётках.

Список литературы

[1] B. Polovnikov, J. Scherzer, S. Misra, X. Huang, C. Mohl, Z. Li, J. Göser, J. Förste, I. Bilgin, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Högele, A.S. Baimuratov, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 076902 (2024).

[2] S. Zhao, X. Huang, R. Gillen, Z. Li, S. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Maultzsch, J. Hone, A. Högele, A.S. Baimuratov, *Nano Lett.* **24**, 4917 (2024).

Квантовые точки в топологических изоляторах: достижения и перспективы

Д.В. Хомицкий^{1,*}, Е.А. Лаврухина¹

¹Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

*e-mail: khomitsky@phys.unn.ru

Проблема интегрирования структур на основе топологических изоляторов в схемы наноэлектроники и спинтроники возникла практически сразу после начала периода интенсивного исследования топологических изоляторов в середине 2000-х годов. Несмотря на несомненный прогресс в понимании их фундаментальных свойств, отраженный, в том числе, в обзорах [1,2] и учебных пособиях [3], их практические применения наталкиваются на ряд трудностей, которые связаны, в том числе с нелокальной, распространяющейся природой топологически защищённых краевых состояний. Для локализации состояний привлекаются, в частности, магнитные барьеры, что снимает ряд свойств топологической защищённости, к тому же размещение микромагнитов на крае топологического изолятора встречает значительные технологические трудности. Это обуславливает затруднения при формировании в топологических изоляторах компактных структур вида квантовых точек, которые позволили бы интегрировать их в схемы для хранения и обработки информации, в том числе для создания новых схем кубитов. Актуальность задачи о создании таких квантовых точек и управлении их свойствами, по нашему мнению, остаётся высокой.

В представляемом докладе будет дан краткий обзор ряда моделей и экспериментальных результатов по квантовым точкам в топологических изоляторах. Будут рассмотрены структуры на основе двумерных [4,5,6] и трёхмерных [7] топологических изоляторов с магнитными барьерами, а также результаты некоторых экспериментов [8,9]. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития моделей и технологий для создания таких структур, которые позволили бы получить практически значимые результаты как в фундаментальной, так и в прикладной сферах.

Список литературы

- [1] X.-L. Qi, S.-C. Zhang, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1057 (2011).
- [2] З.Д. Квон, Д.А. Козлов, Е.Б. Ольшевский, Г.М. Гусев, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, *УФН*, **190**(7), 673 (2020).
- [3] B.A. Bernevig, *Topological insulators and topological superconductors*, Princeton University Press (2013).
- [4] C. Timm, *Phys. Rev. B*, **86**, 155456 (2012).
- [5] D.V. Khomitsky, A.A. Konakov and E.A. Lavrukina, *J. Phys. Cond. Mat.*, **34**, 405302 (2022).
- [6] Е.А. Лаврухина, Д.В. Хомицкий, А.В. Тележников, *ФТП*, **57**(7), 551 (2023).
- [7] G.J. Ferreira and D. Loss, *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 106802 (2013).
- [8] S. Cho, D. Kim, P. Syers, N.P. Butch, J. Paglione, and M.S. Fuhrer, *Nano Lett.* **12**, 469 (2012).
- [9] A. Kononov, S.V. Egorov, Z.D. Kvon, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, E.V. Devyatov, *Письма в ЖЭТФ*, **101** (11-12), 913 (2015).

Соответствие граница-объем при кроссвере между целочисленным и спиновым квантовыми эффектами Холла

М. В. Парфенов,^{1,2,*} И. С. Бурмистров^{1,2}

¹*L. D. Landau Institute for Theoretical Physics, Semenov 1-a, 142432, Chernogolovka, Russia*

²*Laboratory for Condensed Matter Physics, HSE University, 101000 Moscow, Russia*

*email: maksimquery@gmail.com

Последнее время изучение кроссверов между системами с нетривиальными топологическими свойствами представляет большой интерес. Классическим примером таких систем является двумерный электронный газ в режиме целочисленного квантового эффекта Холла (iqHe) (класс А в классификации Алтланда-Цирнбауэра). В сверхпроводящих системах с нарушенной симметрией обращения времени ($d_{x^2-y^2} + id_{xy}$ спаривание [1] или уровни Ландау на фоне решетки вихрей Абрикосова) возможно возникновения спинового квантового (sqHe) эффекта Холла, при котором из-за наличия квазичастичных краевых делокализованных мод происходит квантование поперечной спиновой проводимости целыми четными числами. Описание данных эффектов возможно с помощью эффективной теории поля мягких диффузионных мод (нелинейная сигма модель), где за возникновение переходов между плато и за ненулевое значение диссипативной проводимости в точке перехода оказываются ответственны топологические объемные возбуждения – инстантоны [2,3]. Наша работа [4] посвящена изучению поведения топологических возбуждений – инстантонов при кроссвере между sqHe и iqHe. Такой кроссвер может быть реализован с помощью учета ненулевого Зеемановского расщепления в краевом Гамильтониане для сверхпроводящего класса С. Мы показываем, как Зеемановское поле приводит к расщеплению ветвей краевого спектра, что делает возможным возникновение фаз с нечетными значениями квантованной поперечной спиновой проводимости, как и должно быть для ЦКЭХ. Также нами показано, что объемный механизм такого кроссвера: деформация топологических возбуждений под действием спинового расщепления. А именно, инстантоны с топологическими зарядами ± 1 (которые определяют ведущую непертурбативную поправку к спиновым проводимостям) исчезают (так как их размер ограничен зеемановским полем), а инстантоны с топологическими зарядами ± 2 трансформируются в топологические возбуждения, которые ответственны за квантование проводимости в обычном ЦКЭХ. Также мы демонстрируем, что такой кроссвер может быть наблюдаем с помощью измерения ширины плато, как функции магнитного поля. Полученный результат может быть представлен как фазовая диаграмма, представленная на рисунке. Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FFWR-2024-0017).

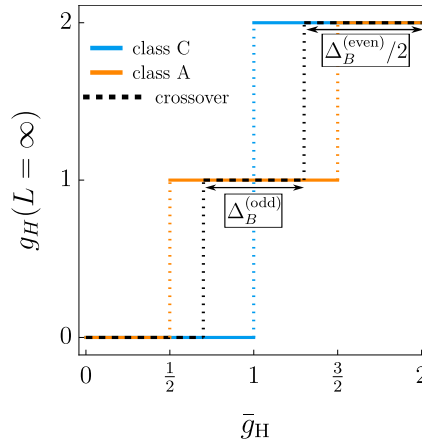


Рис. 1. Квантование поперечной спиновой проводимости

Список литературы

- [1] Senthil, T., and M. P. A. Fisher, Phys. Rev. B 60 (1999)
- [2] A. M. M. Pruisken, Nucl. Phys. B 285, 719 (1987).
- [3] M. V. Parfenov, I. S. Burmistrov, Phys. Rev. B 110, 165431 (2024)
- [4] M. V. Parfenov, I. S. Burmistrov, arXiv:2502.21230 (2025)

**Топологический эффект Холла при фазовом
переходе первого рода в ферромагнитных манганитах лантана**

А.А. Повзнер*, А.Н. Филанович, Э.И. Лопатко, Н.А. Зайцева

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*email: a.a.povzner@urfu.ru

На основе проведенных первопринципных DFT-расчетов получено, что фазовый переход первого рода в ферромагнитных полупроводниках $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ [1], приводит к смене знака параметра мода-мода в функционале Гинзбурга-Ландау. При этом выше температуры Кюри T_C формируются области ферромагнитных спиновых корреляций, с фиксированными в пределах радиусов корреляций значениями фаз Берри. Показано, что из-за набега фаз при обходе узлов различных областей спиновых корреляций возникает спиновая киральность, приводящая к обнаруженному на эксперименте аномальному эффекту Холла [2]. С учетом результатов первопринципного DFT-моделирования электронной структуры $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, рассматривается наблюдаемая при электронном переходе металл-полупроводник, температурная зависимость холловского сопротивления. Отмечается, что при температурном сдвиге химического потенциала за пределы области вырождения Берри, спиновая киральность и топологический эффект Холла исчезают.

Результаты получены в рамках задания Министерства Науки и Высшего Образования, контракт № FEUZ-2023-0015.

Литература

- [1] Н.Г. Бебенин, Р.И. Зайнуллина, В.В. Устинов. УФН, **188**, № 8, 801 (2018)
- [2] Han Wang, Yinguang Dai, at all Progress in Materials Science, 130, 10971 (2022)

Связанные состояния и рассеяние магнонов на сверхпроводящем вихре в гетероструктурах ферромагнетик-сверхпроводник

Д. С. Катков^{1,*}, С. С. Апостолов^{1,2}, И. С. Бурмистров^{1,2}

¹Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау, ул. Косыгина, д. 2, г. Черноголовка, Московская обл., 142432

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Мясницкая, д. 20, г. Москва, 101000
*katkov.ds@phystech.su

Гетероструктуры ферромагнетик-сверхпроводник (SF) привлекают интерес экспериментаторов и теоретиков. Исследования таких структур могут также представлять практический интерес. Так, например, известно явление образования пар скирмион-вихрь в SF-структурах, причем в таких парах могут образовываться майорановские моды, которые было предложено использовать в качестве платформы для квантовых вычислений [1]. Кроме того, экспериментально исследуются особенности поведения магнонов в таких гетероструктурах. Например, рассеяние магнонов на возмущении, создаваемом с вихрями в сверхпроводнике [2]. В настоящей работе рассматривается SF гетероструктура и изучается задача о спектре магнонов в ферромагнетике в присутствии одиночного сверхпроводящего пирловского вихря.

Воспользовавшись подходом из работы [3], можно свести задачу о спектре магнонов к решению квантового гамильтониана 2x2 типа Боголюбова-Де Жена, потенциал в котором будет определяться внешним магнитным полем и профилем намагниченности ферромагнетика с учетом этого внешнего поля. Находя и подставляя профили магнитного поля и намагниченности, соответствующие пирловскому вихрю, получается эффективный потенциал для магнонов, напоминающий экранированный на масштабе пирловской длины λ кулоновский потенциал. Обнаруживается, что в такой системе существуют связанные магнонные состояния (локализованные в пространстве периодические во времени колебания магнитного поля), причем их число ζ конечно и определяется только материальными параметрами ферромагнетика.

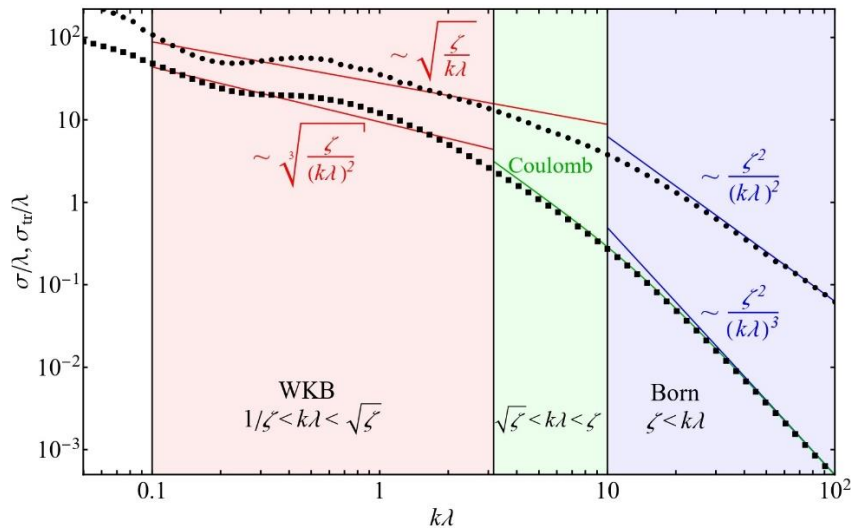


Рис. 1. Зависимость полного и транспортного сечения рассеяния магнонов на вихре от их волнового вектора

Решение задачи рассеяния на эффективном потенциале в борновском и квазиклассическом приближениях позволяет получить приближенные формулы для полного и транспортного сечений рассеяния. На рис. 1 представлено сравнение численного счета (круглые символы для полного и квадратные для транспортного сечений рассеяния) и полученных асимптотических формул (сплошные линии) при различных значениях волнового вектора магнонов k при реалистичном для эксперимента значении $\zeta=10$. Кроме того в задаче рассеяния учет по теории возмущений члена взаимодействия Дзялошинского-Мории приводит к слабой асимметрии рассеяния.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-12-00357.

Результаты опубликованы: Письма в ЖЭТФ, том 120, вып. 9, с. 681 – 689 (2024)

[1] S.T. Konakanchi, J.I. Vayrynen, Y.P. Chen, P. Upadhyaya, and L.P. Rokhinson, Phys. Rev. Res. 5, 033109 (2023).

[2] O.V.Dobrovolskiy, R. Sachser, T. Brächer, T. Böttcher, V. Kruglyak, R.V. Vovk, V.A. Shklovskij, M. Huth, B. Hillebrands, and A.V. Chumak, Nat. Phys. 15, 477 (2019).

[3] C. Schütte and M. Garst, Phys. Rev. B 90, 094423 (2014).

Хеометрия электрофизических свойств нанометровых пленок PdO *p*-типа, используемых в качестве сенсоров на *ppb*-концентрации озона в воздухе.

Чистяков В. В.^{*1}, Рябцев С.В.², Аль-Хабиб А.А.К.², Соловьев С.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Воронежский государственный университет

*email: v.chistyakov@mail.ioffe.ru

Изучено влияние адсорбционно-десорбционных процессов на электрофизические свойства тонких (~30 нм) плёнок оксида палладия, получаемых окислением на воздухе нанесённых на кварц слоёв Pd [1]. При циклической температурной модуляции от 50 до 250°С в воздухе с аналитом (озон, хлор) обнаружена несимметричность кондуктометрических сигналов, выражающаяся в петле гистерезиса. При этом усреднённый экстрагированный сигнал $S_{extr, mC}$ лучше всего ($adj-R^2 > 0.996$) удовлетворял формуле Йовановича с учётом адсорбционного влияния на подвижность носителей. Проведены опыты по температурно-программируемой десорбции (ТПД) озона и по их результатам специфицирован кондуктометрический аналог уравнения Вигнера – Поляни (В.-П), согласно которому а) процесс имеет 1-й порядок по величине адсорбции озона, б) скорость его десорбции определяется конкуренцией потоков в приповерхностный слой дырок и валентных электронов объёма, приводящих к в) образованию инверсного слоя. Численное интегрирование уравнения в направлении десорбции (от 50 к 250°С) давало хорошее совпадение с экспериментом (Рис.1 зел.) в то время, как в обратном направлении давало нулевую начальную адсорбцию (красн.). Результаты интерпретируются в рамках гипотезы (расчёты DFT [2]), что материал является топологическим полуметаллом.

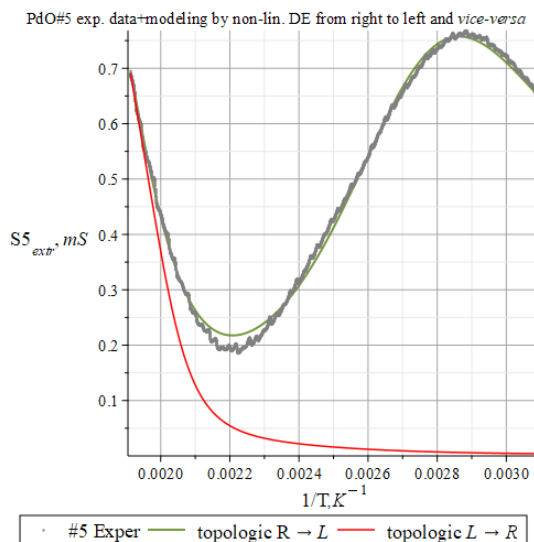


Рис.1. Сигнал электропроводности при ТПД О₃ и интегральные кривые уравнения В.-П.

Список литературы

- [1] Чистяков В.В., Рябцев С.В., Аль-Хабиб А.А.К., Соловьев С.М., ФТТ,12,2107, (2023)
- [2] Xu L ,Meng W , Zhang X , Dai X , Liu Y , Wang L , Liu G, PCCP, 22(33):18447,(2020)

Магнетосопротивление слоистых квазидвумерных проводников

Т. И. Могилюк,^{1,*} П. Д. Григорьев^{2,3}

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182
Москва, Россия

²Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, 142432 Черноголовка,
Россия

³Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
119049 Москва, Россия

*email: 5staras@mail.ru

Существует два основных метода измерения электронной структуры в объёме слоистых квазидвумерных проводников: фотоэмиссионная спектроскопия с угловым разрешением (ФЭС) и магнитные квантовые осцилляции (МКО). ФЭС более нагляден, чем МКО, но имеет худшее разрешение по энергии и импульсу и требует высококачественной поверхности образца и сложной техники. Разрешение ФЭС часто недостаточно для изучения тонкого энергетического расщепления и перестройки поверхности Ферми электронными фазовыми переходами. МКО предоставляют инструмент для измерения геометрии поверхности Ферми с гораздо более высокой точностью, чем ФЭС, а также дают информацию об эффективной массе, свободном времени пробега и g-факторе носителей заряда. Характерной особенностью МКО является их высокая чувствительность к температуре и беспорядку, включая макроскопические неоднородности образца. Однако извлечение этой информации из экспериментальных данных по МКО нуждается в построении количественной теории МКО. Мы рассчитали магнитные квантовые и медленные осцилляции внутрислоевой холловской проводимости σ_{xy} в квазидвумерных металлах в квантующем магнитном поле, предполагая, что осциллирующая часть всё ещё намного меньше монотонной части. Этот расчёт основан на формуле Кубо-Стреды. Теория учитывает рассеяние электронов на дефектах кристалла ближнего действия, например, на примесях, и пренебрегает электрон-электронным взаимодействием. Последнее приближение оправдано в металлическом пределе большого числа заполненных уровней Ландау и конечного интеграла межслоевого переноса t_z . Ранее подобный расчёт в квазидвумерных металлах проводился только для диагональных компонент проводимости [1, 2]. Мы вычисляем тензор внутрислоевого магнетосопротивления, что позволяет проводить прямое сравнение с экспериментальными данными. Например, мы предсказываем немонотонную полевую зависимость амплитуды и фазы медленных осцилляций в определённом диапазоне параметров, зависящую от поля разность фаз между осцилляциями диагональной и холловской компонент магнетосопротивления, разницу между МКО внутрислоевого и межслоевого магнетосопротивления и т. д. Разработанная теория и её результаты полезны для описания транспортных свойств в различных анизотропных квазидвумерных металлах, включая высокотемпературные сверхпроводники, редкоземельные полителлуриды, слоистые халькогениды, ван-дер-ваальсовы кристаллы, гетероструктуры, органические металлы и т. д.

Список литературы

- [1] P. D. Grigoriev, Phys. Rev. B **67**, 144401 (2003).
- [2] T. I. Mogilyuk, P. D. Grigoriev, Phys. Rev. B **98**, 045118 (2018).

Нелинейная сигма-модель для диссипативной динамики, сохраняющей число частиц

А.А. Люблинская,^{1,*} И.С. Бурмистров²

¹Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау, Черноголовка, Россия

²НИУ «Высшая школа экономики», Москва, Россия

*email: lyublinskaya@itp.ac.ru

В данной работе мы исследуем динамику и устойчивые состояния в диссипативных фермионных системах с сохраняющимся числом частиц. Тематика открытых квантовых систем последнее время привлекает много внимания в научном сообществе [1,2], однако бозонные модели изучены гораздо подробнее, чем фермионные [3].

В предыдущих работах по теме мы рассматривали двухзонные фермионы при помощи диаграммной техники в формализме Келдышевского функционального интеграла. Был явно получен диффузон в лестничном приближении с использованием коэффициента диссипации в качестве малого параметра [4]. Это позволило найти коэффициенты диффузии в верхней и нижней зонах, а также показать, что межзонная диффузия в системе отсутствует. Далее была вычислена собственная энергия диффузона в главном порядке по коэффициенту диссипации [5]. Эта величина получилась отрицательной, что указывает на неустойчивость тривиального темнового состояния (т. н. dark state) для целого класса двухзонных систем, поскольку наша обобщённая модель не фиксирует ни форму спектра, ни конкретный вид прыжковых операторов. Вычисленная собственная энергия позволила дополнить уравнение диффузии дополнительными слагаемыми, что привело его к виду уравнения Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова (ФКПП).

Рассмотренная в этих работах модель является обобщением системы, представленной в статье [6]. Её выводы противоречат нашим результатам, и если с наличием диффузионного поведения авторы уже согласились, то неустойчивость темнового состояния по-прежнему вызывает вопросы. В связи с этим в данной работе мы продолжаем изучение двухзонных фермионных систем с диссипацией и сохраняющимся числом частиц в рамках Келдышевской нелинейной сигма-модели. Помимо воспроизведения предыдущих результатов в новом формализме, мы исследуем модель на наличие фазового перехода между устойчивостью и неустойчивостью темнового состояния. В бозонных моделях аналогичный квантовый фазовый переход изучен [3], и его называют переходом между активной фазой (active phase) и темновой фазой (dark phase). Подобный результат мог бы поставить точку в вопросах об устойчивости темнового состояния в рассматриваемой модели, и поэтому его получение является главной целью нашей работы.

Список литературы

- [1] Victor V. Albert et al., Phys. Rev. X **6**, 041031 (2016).
- [2] L. M. Sieberer, M. Buchhold, and S. Diehl, Rep. Prog. Phys. **79**, 096001 (2016).
- [3] F. Thompson, A. Kamenev, SciPost Phys. **18**, 046 (2025).
- [4] A. A. Lyublinskaya, and I. S. Burmistrov, JETP Letters, Vol. **118**, No. 7, pp. 524–530 (2023).
- [5] A. A. Lyublinskaya, P. A. Nosov, and I. S. Burmistrov, Phys. Rev. B **111**, 094302 (2025).
- [6] F. Tonielli, J. C. Budich, A. Altland, and S. Diehl, Phys. Rev. Lett. **124**, 240404 (2020).

Энергетический спектр и распространение экситонов в муаровых сверхрешётках

А.М. Шенцев,^{1,2,*} М.М. Глазов³

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: shentsev.am@phystech.edu

В двумерных ван-дер-ваальсовых материалах широко изучаются эффекты, связанные с наличием муара, обусловленного рассогласованием постоянных решеток слоев и их разворотом друг относительно друга [1]. За счет него в гетероструктурах на основе дихалькогенидов переходных металлов возникает почти периодический потенциал, действующий на носители заряда и экситоны. В таких муаровых сверхрешетках квантовомеханическое туннелирование подавлено, поскольку энергетические барьеры между соседними минимумами потенциала достаточно высокие и широкие, поэтому во многих работах считается, что носители заряда и кулоновские комплексы в таких системах локализованы [2].

В нашей работе предложен механизм делокализации оптически-активных экситонов за счет их взаимодействия с индуцированным ими электромагнитным полем. Этот механизм вполне аналогичен ферстеровскому переносу энергии и основан на виртуальных процессах генерации и рекомбинации экситонов в узлах муаровой сверхрешетки. На примере простейшей модели светоэкситонного взаимодействия, в которой экситоны рассматриваются как точечные диполи, локализованные в узлах муаровой сверхрешетки показано, что в энергетическом спектре экситонов имеются две ветви. В пределе малых по сравнению с обратным периодом решетки волновых векторов одна из них – «поперечная» (микроскопический дипольный момент экситона ортогонален его волновому вектору) – является бездисперсионной, а вторая – «продольная» – обладает линейной дисперсией [3].

На основе найденной дисперсии был рассчитан коэффициент диффузии D для «продольных» экситонов с учетом их взаимодействия со статическим беспорядком и длинноволновыми продольными акустическими фононами как в квазиклассическом, так и в прыжковом режимах транспорта. В случае слабого беспорядка оценки показывают, что $D \sim 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ при комнатной температуре и возрастает с понижением температуры [3]. В случае, когда беспорядок сильный и экситоны локализованы в минимумах муарового потенциала реализуется перенос с переменной длиной прыжка. Интересно, что в отличие от классических законов Мотта и Шкловского-Эфроса, где коэффициент диффузии зависит экспоненциально от температуры, действующий характер переноса между узлами решетки посредством электромагнитного поля приводит к степенной закон зависимости коэффициента диффузии от температуры [3].

Список литературы

[1] Yao Xiao, Jinglu Liu, and Lei Fu. Moiré is more: Access to new properties of two-dimensional layered materials. *Matter* **3**, 1142 (2020).

[2] Zidong Li, Xiaobo Lu, Darwin F. Cordovilla Leon, et al., Interlayer exciton transport in $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ heterostructures, *ACS Nano* **15**, 1539 (2021).

[3] A. M. Shentsev, M. M. Glazov, Electromagnetic field assisted exciton diffusion in moiré superlattices, *Phys. Rev. B* **111**, 045301 (2025).

Многочастичные комплексы в инкапсулированных монослоях дихалькогенидов переходных металлов

В.Е. Бисти,* Г.М. Гольш科夫, А.С. Бричкин, А.В. Черненко

ИФТТ РАН, Черноголовка, Россия

**email: bisti@issp.ac.ru*

Изучалась люминесценция структур, состоящих из монослоев дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), инкапсулированных гексагональным нитридом бора hBN, при нерезонансном фотовозбуждении электронно-дырочных пар в монослоях. Вследствие туннелирования электронов с донорных примесей из окружающих слоев hBN в монослоях имеются двумерные электроны, образующие ферми-газ и частично локализованные, в окружающих монослой слоях hBN - положительно заряженные примеси. Также экспериментально имеется возможность изменять концентрацию двумерных электронов при приложении напряжения к слою при наличии электрических контактов. При стационарном возбуждении в системе в динамическом равновесии с электронами и дырками существуют свободные экситоны и различные многочастичные комплексы (свободные трионы, экситоны и трионы, локализованные на примесях в слое и в барьере hBN.) В спектрах люминесценции различаются две линии, интерпретируемые обычно как линии экситона и триона (или экситон-полярона, что при низких концентрациях свободных электронов эквивалентно). Наблюдаемые линии сдвигаются при изменении температуры, накачки и электронной концентрации. Энергии экситонов в слоях ДПМ определены экспериментально, существуют хорошо разработанные методы расчета, согласующиеся с экспериментальными значениями [1-3]. Для расчета энергии трионов используются разные методы (вариационные, ферми-поляронный подход с использованием диаграммной техники, использование модельных потенциалов), однако вопрос еще не закрыт. В данной работе рассчитывались энергии связи трионов и экситонов, локализованных на заряженных примесях, для взаимодействия, рассматриваемого на больших расстояниях как диполь-зарядное, а на малых аппроксимируемого различными способами [4-6]. Поляризуемость экситонов в монослоях ДПМ сильно зависит как от материала монослоя, так и диэлектрического окружения, и величина ее в общем случае не определена. Проводимые расчеты и эксперименты сравнивались между собой, что позволило оценить экситонную поляризуемость. Также можно выделить наиболее реалистичную аппроксимацию диполь-зарядного взаимодействия на малых расстояниях.

Список литературы

- [1] М. В. Дурнев, М. М. Глазов. УФН **188**, 913 (2018)
- [2] B. Han, C. Robert, E. Courtade, M. Manca et al. Phys. Rev. X **8**, 031073 (2018).
- [3] Г. М. Гольш科夫, А. С. Бричкин, В. Е. Бисти, А. В. Черненко. Письма в ЖЭТФ 2024 **120**, 279 (2024).
- [4] Ю. Е. Лозовик, М. В. Никитков. ЖЭТФ **111**, 1107 (1997).
- [5] D. K. Efimkin, E. K. Laird, J. Levinsen, M. M. Parish, and A. H. MacDonald, Phys. Rev. **B103**, 175417 (2021).
- [6] C. Fey, P. Schmelcher, A. c Imamoglu, and R. Schmidt, Phys. Rev. **B101**, 195417 (2020).

Нечетная вязкость двумерного электронного газа с плавным беспорядком и аномальный эффект Холла

Д. С. Зограбян,^{1,*} М.М. Глазов²

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: zohrabyan.ds@phystech.edu

В работе изучается аномальный транспорт в двумерном электронном газе при наличии плавного случайного потенциала в рамках кинетического уравнения Больцмана. Для плавного потенциала может возникать «квази-гидродинамический» режим электронного транспорта, поскольку время релаксации второй и более высоких гармоник функции распределения значительно короче времени релаксации первой угловой гармоники. Спин-орбитальное взаимодействие приводит к появлению асимметричных по волновому вектору спин-зависимых вкладов в интеграле столкновений (skew-scattering). Ранее исследовалась роль таких вкладов в эффекте асимметричного рассеяния, который приводит к «развороту» первой угловой гармоники функции распределения и, соответственно, к спиновому, а при наличии внешнего магнитного поля и к аномальному эффекту Холла [1].

Цель данной работы заключается в исследовании эффекта нечетной (недиагональной) вязкости двумерного электронного газа

$$\eta_{xy} = -\eta_{yx} = \Upsilon P_s,$$

обусловленной асимметричным рассеянием на плавном беспорядке при наличии спиновой поляризации P_s электронного газа. В данной работе рассчитан коэффициент Υ для случайного потенциала, коррелятор которого описывается функцией Гаусса, и для экранированного кулоновского взаимодействия. Показано, что в пределе короткодействующего случайного потенциала $\Upsilon \rightarrow 0$. Также получены уравнения гидродинамики электронов с учетом нечетной вязкости [2]. Обсуждается вклад электрон-электронных столкновений в константу Υ .

Список литературы

[1] N. A. Sinitsyn, Semiclassical theories of the anomalous Hall effect, Journal of Physics: Condensed Matter **20**, 023201 (2007).

[2] K. K. Grigoryan, D. S. Zohrabyan, and M. M. Glazov, “Anomalous Hall effect in ultraclean electronic channels” Phys. Rev. B **102**, 085301 (2024).

Фототок в сверхпроводниках, индуцированный структурированным (закрученным) светом

О.Б. Зуев^{1,*}, М.В. Коваленко¹, А.С. Мельников^{1,3}

¹Московский Физико-Технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

²Институт Теоретической Физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

³Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

*email: vip.zuev.oleg@mail.ru

Цель нашей работы — развитие феноменологической теории для описания взаимодействия сверхпроводящего конденсата с Бесселевым пучком структурированного (закрученного) света с ненулевой проекцией углового момента m . Вопросы взаимодействия света с веществом многократно рассматривались ранее для металлов, полупроводников и плазмы. В том числе, в недавней работе [1] авторы вычислили вклады в ток, который Бесселев пучок индуцирует в слое полупроводника. В контексте сверхпроводников одной из первых работ в этой области стала [2], в ней рассмотрено взаимодействие сверхпроводника с плоской волной. Наша работа является её прямым продолжением и обобщением на случай Бесселевых пучков. Используя нестационарную теорию Гинзбурга-Ландау и уравнения Максвелла в сверхпроводнике, мы вычислили фотоиндуцированный ток на нулевой частоте, а также ток на второй гармонике. Фототок на нулевой частоте содержит такие типичные вклады, как обратный эффект Фарадея, эффект увлечения куперовских пар фотонами и пондеромоторную силу. С помощью уравнения Лондонов мы также посчитали компенсирующие Мейснеровские токи на нулевой частоте. Учитывая полученные токи, мы вычислили магнитное поле на поверхности сверхпроводника, которое является экспериментально измеримой величиной. Результаты для сверхпроводящего полупространства мы обобщили для случая тонкой плёнки.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 25-12-00042).

Список литературы

[1] A. A. Gunyaga, M. V. Durnev, and S. A. Tarasenko, Phys. Rev. B 108, 115402, (2023).

[2] S. V. Mironov, A. S. Mel'nikov, and A. I. Buzdin, Phys. Rev. Lett. 132, 096001, (2024).

Стимуляция сверхпроводимости рассеянием на немагнитных примесях в гибридных структурах сверхпроводник-альтермагнетик

М.М. Васякин^{1,*}, А.С. Мельников^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия

²Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия

*email: vasiakin.mm@phystech.edu

В данной работе нами исследовано влияние рассеяния электронов на примесях на критическую температуру сверхпроводящего перехода в гибридных структурах сверхпроводник-альтермагнетик в случае произвольной концентрации примесей.

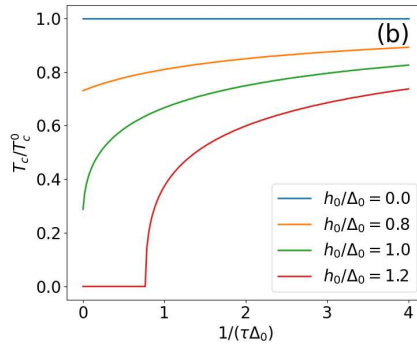


Рис. 1: Критическая температура T_c бислоя сверхпроводник-альтермагнетик как функция времени свободного пробега τ при различных значениях амплитуды обменного поля h_0 , где T_c^0 – критическая температура в отсутствии обменного поля, Δ_0 – параметр порядка при нулевой температуре в отсутствии обменного поля.

При этом мы рассматриваем модельную систему – бислой сверхпроводник - альтермагнетик достаточно малой толщины, чтобы можно было считать параметр порядка однородным по толщине образца. Предполагается, что в сверхпроводнике реализуется стандартный синглетный тип спаривания, а обменное поле соответствует альтермагнетику d- типа и направлено по нормали к тонкопленочной структуре: $h = h_0 \sin 2\phi$, где h_0 – амплитуда поля, а ϕ – полярный угол импульса электрона в плоскости слоев. Расчеты выполнены в рамках теории Горькова. Изотропное рассеяние на немагнитных примесях приводит к эффективному усреднению обменного поля по ферми-поверхности и повышению критической температуры сверхпроводящего перехода (см. рис. 1). Обсуждается аналогия рассматриваемого эффекта с механизмом спиновой релаксации Дзяконова-Переля. В пределе «грязного» сверхпроводника механизм Дзяконова-Переля приводит к возникновению эффективных магнитных примесей с амплитудой спинового рассеяния $\sim h_0^2\tau$, где τ^{-1} – это частота рассеяния на примесях. Дополнительное магнитное рассеяние может приводить к немонотонной зависимости критической температуры от концентрации примесей.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-12-00042.

Магнетофононный резонанс в двумерных системах. Оригинальный метод выделения полезного сигнала.

И.Л. Дричко, И.Ю. Смирнов,* М.О. Сафончик, М.А. Шахов

ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН Санкт-Петербург, Россия

*email: ivan.smirnov@mail.ioffe.ru

В 1961 году Гуревич и Фирсов [1] теоретически предсказали магнетофононный резонанс сопротивления на оптических фононах в 3-х мерных полупроводниках. И уже в 1963 году этот эффект был обнаружен авторами работ в кристаллах n -InSb. Почти через 20 лет, в 1980 году, магнетофононный резонанс (МФР) на оптических фононах был открыт и в 2-мерных системах. После его открытия МФР активно изучался на двумерных объектах. Положение максимумов осцилляций в магнитном поле должно соответствовать условию: $\omega_{LO} = N\omega_c$, $\omega_c = eB/m^*c$, где ω_{LO} – частота оптического фонона, ω_c – циклотронная частота, m^* – эффективная масса, N – номер осцилляции.

Этот эффект наблюдается в сильных магнитных полях, обычно недостижимых в лабораторных сверхпроводящих магнитах, а амплитуда осцилляций оказывается менее 1% от фона. Для наблюдения МФР было использовано импульсное магнитное поле, а для выделения осцилляций специальная обработка.

Магнетофононные осцилляции измерялись в системах с квантовыми ямами GaAs и InGaAs. После стандартной обработки полученных данных исследовались зависимости удельного сопротивления R от магнитного поля, которые содержали как сами осцилляции, так и высокочастотный шум на фоне плавного хода магнитосопротивления (тренда). В нашем случае амплитуда тренда превышала амплитуду осцилляций на два порядка, а амплитуда шумов – на порядок.

Для выделения магнетофононных осцилляций был использован метод из библиотеки AlgLib [2], разработанный специально для обработки экспериментальных данных – регрессионный сплайн со штрафной функцией (РСШФ). Он позволяет провести единую плавную кривую с непрерывными первой и второй производными максимально близко к данным даже при наличии больших разрывов в данных и при отсутствии аналитической формулы аппроксимации. Хотя РСШФ не является фильтром, удобно представлять его действие как фильтр нижних частот с крутой частотной характеристикой (более 30 дБ/декаду). Авторский пакет SafLab позволяет подбирать параметры РСШФ для получения заданной частоты среза фильтра нижних частот, отсекая частоты выше заданной. При обработке метод РСШФ использовался дважды. Вначале высокочастотные шумы удалялись этим фильтром с частотой среза выше характерного диапазона частот осцилляций. Затем тренд выделялся РСШФ с частотой среза меньше частоты осцилляций и вычитался из сглаженного сигнала $R(B)$.

Исследования магнетофононных осцилляций, выделенных из экспериментальных данных с помощью РСШФ показали, что при температурах 90-180 К в двумерных объектах с квантовой ямой резонансное рассеяние электронов происходит на объемных оптических продольных фононах и не зависит от размерности системы.

Список литературы

- [1] В.Л. Гуревич, Ю.А. Фирсов, ЖЭТФ **40**, 198 (1961).
- [2] <https://alglib.net>

Теория линейной поляризации фотолюминесценции темного экситона в коллоидных наноплателетах

О.О. Смирнова,^{1,*} А.В. Родина¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: smirnova.olga248@gmail.com

Коллоидные полупроводниковые наноплателеты уже нашли применение, например, в оптоэлектронике, фотовольтаике и биологии [1], благодаря эффективному взаимодействию со светом и фотостабильности. Работа продолжает теоретическое исследование спиновых и оптических свойств нанокристаллов, интересных как с фундаментальной точки зрения, так и для обнаружения новых возможных применений.

В ансамбле коллоидных наноплателетов с оболочкой CdSe/CdS впервые для подобных структур наблюдались эффекты оптического выстраивания и оптической ориентации экситонов [2]. Нижними по энергии в наноплателетах являются состояния темного, оптически запрещенного в дипольном приближении, и светлого, оптически разрешенного, экситонов. Времена жизни светлого и темного экситонов, определяемые из распада интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) во времени, составляют порядка 1 нс и 100 нс, соответственно [2]. При этом линейная поляризация ФЛ в случае импульсного возбуждения проявляется и на временах, значительно превышающих время жизни светлого экситона [3]. Ее наличие связано с излучением темного экситона и коррелирует с появлением при постоянной накачке узкого контура в эффекте оптического выстраивания экситонов в зависимости от внешнего магнитного поля в геометрии Фарадея [2].

Теоретическая модель описывает интенсивность и поляризацию ФЛ при низкой температуре с помощью двух псевдоспинов, соответствующих парам состояний светлого и темного экситонов. Псевдоспины прецессируют в эффективных магнитных полях, учитывающих внешнее магнитное поле, перпендикулярное плоскости наноплателета, и анизотропное расщепление экситонов в плоскости. Активация излучательной рекомбинации темного экситона происходит за счет подмешивания светлых состояний, правила отбора для которых наследуются при излучении [4]. Рассмотрено возмущение, обусловленное наличием слабого флуктуационного магнитного поля в плоскости наноплателета. Такое подмешивание обеспечивает, с одной стороны, накачку псевдоспина темного экситона, с другой – активацию его излучательной рекомбинации. При этом передача и высвечивание циркулярно поляризованной компоненты (оптическая ориентация) в геометрии Фарадея не зависят от направления флуктуационного магнитного поля. Для появления же оптического выстраивания темного экситона (линейной поляризации в плоскости) направление флуктуационного магнитного поля должно сохраняться на времени жизни темного экситона. Полученные выражения усредняются по направлению флуктуационного поля в отдельных наноплателетах и по ориентации наноплателетов в ансамбле.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00300.

Список литературы

- [1] B. T. Diroll *et al.*, Chem. Rev. **123**(7), 3543-3624 (2023).
- [2] O.O. Smirnova *et al.*, Nanomaterials **13**(17), 2402 (2023).
- [3] O.O. Smirnova *et al.*, Optical materials **159**, 116469 (2025).
- [4] A. V. Rodina and Al. L. Efros, Phys. Rev. B **93**, 155427 (2016).

Энергетический спектр носителей заряда в сферических нанокристаллах: влияние обобщенных граничных условий

К.И. Русских,^{1,*} А.А. Головатенко¹, А.В. Родина¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

*email: kirill.russkih99@gmail.com

В настоящее время для оптоэлектронных применений активно исследуются оптические свойства коллоидных нанокристаллов (НК), не содержащих Cd. Однако теоретически энергетическая структура носителей заряда в таких НК как InP, ZnSe и гетероструктурах ядро/оболочка InP/ZnSe изучена не до конца.

Изучен энергетический спектр электронов и дырок в НК InP, ZnSe и InP/ZnSe в рамках восьмизонной $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ модели. Рассмотрены нижние состояния электрона $1S_e$ (с орбитальным моментом $l = 0$) и $1P_e$ ($l = 1$) и дырки $1S_{3/2}$ ($l = 0, 2$) и $1P_{3/2}$ ($l = 1, 3$) с полным моментом $j = 3/2$, учитывающим спин-орбитальное взаимодействие в валентной зоне. Применены обобщенные граничные условия (ОГУ) для огибающих волновых функций (ОВФ), гарантирующие непрерывность нормальной компоненты потока плотности вероятности на гетерогранице (или равенство нулю на поверхности). Для электронов ОГУ, как и в однозонной модели эффективной массы [1], содержат один поверхностный параметр A_e , для дырок – два параметра A_h и A_l , которые не зависят от энергии E состояния или радиуса a НК.

Изучено влияние высоты потенциального барьера для электронов U_B^e , толщины оболочки d и параметров $A_{e,l,h}$ на энергии и ОФВ состояний $1S_e$, $1P_e$, $1S_{3/2}$ и $1P_{3/2}$ в НК InP, ZnSe и InP/ZnSe. Сравнение энергетического расстояния $1P_e - 1S_e$ в зависимости от U_B^e (рис. 1) с экспериментальным значением (~ 460 meV) для НК InP/ZnSe [2] показывает, что U_B^e близок в разнице запрещенных зон ZnSe и InP. Поэтому спектр дырок в НК InP/ZnSe рассмотрен с близким к нулю потенциальным барьером. При этом в случае расчета спектра дырок уже в НК InP и ZnS с $A_l = A_h = 0$ (зануление дырочной ОВФ на поверхности) нижним по энергии состоянием является $1P_{3/2}$, и оптические переходы на основное состояние электрона $1S_e$ ($l = 0$) запрещены, что противоречит экспериментальным данным [2-4]. Применение ОГУ с $A_l \neq 0$ позволяет получить правильный порядок уровней $1S_{3/2}$ и $1P_{3/2}$ (рис. 1).

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ № 23-12-00300.

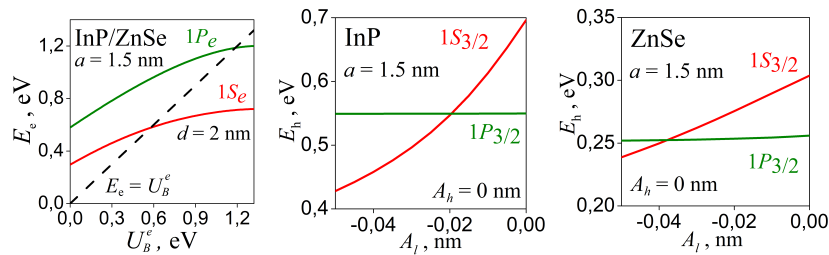


Рис. 1: Энергетический спектр электронов и дырок в НК InP/ZnSe, InP, ZnSe.

Список литературы

- [1] К.И. Русских, А.В. Родина, ФТТ **66**, 110 (2024).
- [2] D.O. Tolmachev et. al., ACS Nano **18**, 9378 (2024).
- [3] Duy Hoang Nguyen et. al. Sci. Rep., **14**, 13982 (2024).
- [4] D. Bertram, O.I. Micic, A.J. Nozik. Phys. Rev. B, **57**, R4265 (1998).

Особенности нелокального сверхпроводящего спаривания в ван-дер-ваальсовых сегнетоэлектриках

А.А. Копасов,^{1,*} Д.С. Анненков^{2,3}, А.С. Мельников^{2,4}

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Москва, 119049, Россия

²МФТИ, Долгопрудный, Московская обл., 141701, Россия

³Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Московская обл.,
142432, Россия

⁴Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, ГСП-105,
Россия

*email: kopasov.aa@misis.ru

Интерес к физике низкоразмерных ван-дер-ваальсовых структур стимулирован возможностью управления различными типами упорядочения (сверхпроводимость, сегнетоэлектричество) за счет эффекта электрического поля. В данной работе показано, что структура сверхпроводящих корреляций и их отклик в ван-дер-ваальсовых системах существенно зависят от нелокальной природы электронного притяжения, которое может приводить к образованию куперовских пар, состоящих из электронов, локализованных в разных слоях гибридной структуры [1-4]. Данный круг вопросов исследован для модельной двухслойной системы в присутствии туннелирования и относительного сдвига энергетических зон в слоях, вызванного наличием спонтанной поляризации, направленной перпендикулярно слоям [5].

Продemonстрировано, что конечный сдвиг энергетических зон приводит к появлению нечетных по частоте сверхпроводящих корреляций и подавлению межслоевой сверхпроводимости. Туннелирование, в свою очередь, стабилизирует однородное сверхпроводящее состояние при больших значениях сдвига зон. Данный эффект проявляется в необычной зависимости критической температуры сверхпроводящего перехода межслоевой сверхпроводимости от относительного сдвига зон. В работе также исследовано влияние внешнего магнитного поля, направленного вдоль плоскости слоев, на межслоевую сверхпроводимость. Влияние парамагнитного эффекта магнитного поля проанализировано как для спин-синглетных межслоевых куперовских пар, так и для спин-триплетных.

В присутствии неоднородного распределения поляризации продемонстрировано возникновение неоднородных сверхпроводящих состояний, локализованных на доменных границах, при температурах, превышающих критическую температуру для однородного сверхпроводящего состояния. Полученные результаты обсуждаются в контексте недавних экспериментальных данных по сосуществованию сегнетоэлектричества и сверхпроводимости в ван-дер-ваальсовых бислоях [6].

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Стратегический проект «Квантовый интернет»).

Список литературы

- [1] M. H. Cohen and D. H. Douglass, Jr., Phys. Rev. Lett. **19**, 118 (1967).
- [2] K. B. Efetov and A. I. Larkin, JETP **41**, 76 (1975).
- [3] M. V. Hosseini and M. Zareyan, Phys. Rev. Lett. **108**, 147001 (2012).
- [4] M. Alidoust, M. Willatzen, and A.-P. Jauho, Phys. Rev. B **99**, 155413 (2019).
- [5] A. A. Kopasov and A. S. Mel'nikov, Phys. Rev. B **110**, 094503 (2024).
- [6] A. Jindal, A. Saha, Z. Li et al., Nature **613**, 48–52 (2023).

Механизмы управления неравновесными состояниями диссипативных топологических сверхпроводников

М.С. Шустин,^{1,*} С.В. Аксенов,¹ И.С. Бурмистров^{1,2}

¹Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

²Международная лаборатория физики конденсированного состояния,
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
Москва, Россия

*email: mshustin@yandex.ru

Прогресс в технологиях создания гибридных наноструктур сверхпроводник / полупроводник с контролируемой геометрией элементов сделал возможным детальное изучение свойств подцелевых состояний в т.ч. майорановских мод (ММ). Было сказано, что последние могут быть эффективно использованы в устройствах квантовых вычислений [1]. В настоящее время перспективными считаются наноструктуры, состоящие из чередующихся квантовых точек и сверхпроводящих островков различной архитектуры, контроль над состояниями которых осуществляется приложением локальных внешних напряжений [2]. С теоретической точки зрения такая система представляет собой пример неравновесного топологического сверхпроводника (ТС), подверженного воздействию внешних резервуаров, в т.ч. диссипативных.

В настоящей работе исследуются спектральные свойства ТС, подверженных влиянию диссипации. Эволюция матрицы плотности системы моделируется в рамках уравнения Горини-Коссаковского-Сударшана-Линдблада [3,4], в котором унитарная эволюция ТС моделируется в рамках квадратичных по Ферми-операторам гамилтонианов, а диссипаторы описываются линейными по ним операторами Линдблада. Основная цель исследования заключалась в анализе эволюции ММ при воздействии на ТС линейных диссипативных полей. В рамках формализма третичного квантования [5] показано, что кинетические моды со строго нулевой энергией имеют общие свойства с ММ. В частности, их возбуждение приводит к существенно нелокальному изменению структуры матрицы плотности, которое неразличимо с точки зрения локальных операторов. Было показано, что если в равновесном сверхпроводнике реализовывалось $2N_{BDI}$ ММ, то количество нулевых мод в диссипативной системе есть $N_0 = 2N_{BDI} - \text{rk } \mathcal{B}$. Матрица $\mathcal{B} \in \mathbb{R}^{2N_{BDI} \times 2N_B}$ описывает гибридизацию $2N_{BDI}$ волновых функций ММ с полями $2N_B$ диссипаторов. Основываясь на этом результате, нами были даны практические рецепты, позволяющие создавать устойчивые неравновесные состояния в ТС за счет диссипативных эффектов.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН. Авторы благодарят фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» за персональную поддержку.

Список литературы

- [1] A. Yu. Kitaev, Ann. Phys. **303**, 2 (2003).
- [2] R. S. Souto, R. Aguado, Lecture Notes in Physics, vol 1025. Springer, Cham. (2024).
- [3] G. Lindblad, Commun. Math. Phys. **48**, 119 (1976).
- [4] V. Gorini, A. Kossakowski, and E. C. G. Sudarshan, J. Math. Phys. **17**, 821–825 (1976).
- [5] T. Prosen, New J. Phys. **10**, 043026 (2008).

Магнитоплазмы в 2D системе с плоским периметрическим контактом

А.В. Никонов^{1,2*}, Д.А. Родионов^{1,3}, А.А. Заболотных^{1,2}

¹*ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

²*НИУ ВШЭ, Москва, Россия*

³*МФТИ, Долгопрудный, Россия*

*email: avnikonov@edu.hse.ru

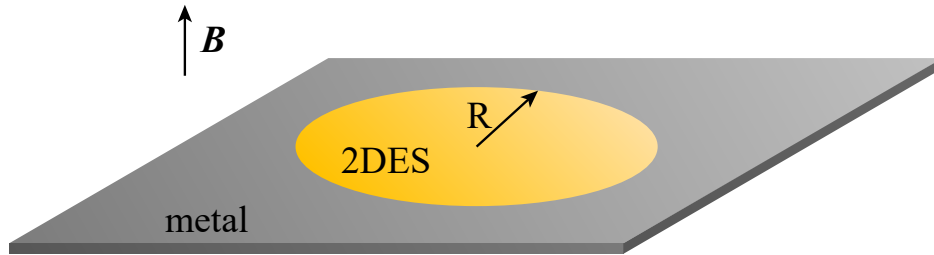


Рис. 1: Схема 2D электронной системы с плоским периметрическим омическим контактом.

В работе рассматривалась латерально ограниченная 2D электронная система в форме диска радиуса R , с периметрическим омическим контактом (рис. 1). Система находилась в однородном диэлектрическом окружении с диэлектрической проницаемостью ε и к ней прикладывалось постоянное перпендикулярное однородное магнитное поле B .

Для определения зависимости плазменной частоты от величины магнитного поля — магнитодисперсии — решались уравнения Максвелла, с использованием закона Ома с динамической бездиссипативной проводимостью Друде для электронной системы. Полученные интегральные уравнения на напряжённость электрического поля внутри диска решались с помощью метода Галёркина.

Получено, что в случае идеально проводящего контакта, фундаментальная плазменная мода при малых магнитных полях становится бесщелевой с линейной магнитодисперсией. Важно отметить, что частота этой моды лежит ниже циклотронной частоты. В свою очередь, коэффициент пропорциональности между частотой и полем зависит от степени электромагнитного запаздывания, которая, как было показано в работах [1, 2], существенно меняет поведение плазменных волн в электронных системах. В рассмотренной системе также обнаружено нетривиальное влияние электромагнитного запаздывания на магнитодисперсию плазменных мод.

А.А.З. благодарит за финансовую поддержку Фонд развития теоретической физики и математики “БАЗИС” (грант № 23-1-3-42-1).

Список литературы

- [1] I. V. Andreev et al., Phys. Rev. B **103**, 115420 (2021).
- [2] A. A. Zabolotnykh et al., Phys. Rev. B **103**, 125301 (2021).

Теория баллистического и сдвигового механизмов фотогальванического эффекта с учетом кулоновского взаимодействия

Г.В. Будкин, Е.Л. Ивченко

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: budkin@mail.ioffe.ru

В работе представлены результаты теоретического исследования фототоков, возникающих при прямых оптических переходах в различных полупроводниковых структурах. Под воздействием переменного электромагнитного поля в макроскопически однородных кристаллах или латерально однородных двумерных полупроводниковых структурах без центра пространственной инверсии могут возникать постоянные фототоки. Такие явления известны как фотогальванические эффекты. Нами исследован линейный фотогальванический эффект при межзонных переходах с точным учетом кулоновского взаимодействия между электроном и дыркой.

Для прямых оптических переходов существует два вклада в фототок: сдвиговый, обусловленный смещением носителей заряда в координатном пространстве, и баллистический, вызванный асимметрией их распределения в импульсном пространстве. В настоящее время значительное число работ посвящено расчету исключительно сдвигового вклада в фотогальванический эффект [1,2], однако в работе [3] указано, что при межзонных оптических переходах доминирует баллистический вклад. Целью данной работы является расчет и сопоставление этих вкладов в линейный фотогальванический эффект в рамках единой модели зонной структуры с учетом кулоновского взаимодействия. Построена детальная микроскопическая теория сдвиговых и баллистических токов с учетом кулоновских корреляций носителей заряда [4]. Разработанная теория применена для расчета линейного фотогальванического эффекта в объемных полупроводниках со структурой цинковой обманки, а также двумерных материалов на основе монослоев дихалькогенидов переходных металлов, обладающих симметрией D_{3h} . Установлено, что учет кулоновского взаимодействия усиливает сдвиговой фототок за счет увеличения оптического поглощения, обусловленного экситонными эффектами, хотя его генерация возможна и без этого учета. Важной особенностью линейного фотогальванического эффекта является то, что при прямых оптических переходах баллистический вклад не возникает без дополнительного рассеяния, как, например, рассмотренного в данной работе, кулоновского рассеяния фотовозбужденного электрона на дырке. Для расчета баллистического вклада в ток нами вычислены матричные элементы оператора скорости на кулоновских функциях непрерывного спектра, в том числе и его недиагональные по волновым векторам компоненты. Рассчитаны частотные зависимости обоих вкладов в фототок в структурах разной размерности. В объемных полупроводниках и монослоях дихалькогенидов баллистический фототок может значительно превосходить сдвиговой. Показано, что доминирование баллистического вклада наблюдается при частотах излучения, когда длина свободного пробега фотовозбужденных носителей заряда больше характерного размера экситона.

Список литературы

- [1] Z. Dai and A. M. Rappe, Phys. Rev. B **104**, 235203 (2021).
- [2] Zhenbang Dai and A. M. Rappe, Chem. Phys. Rev. **4**, 011303 (2023).
- [3] Б. И. Стурман, УФН **190**, 441 (2020).
- [4] Г. В. Будкин, Е. Л. Ивченко, ЖЭТФ **167**, 279 (2025).

Поляронный транспорт и запрещенная зона в магнетите

Н.А. Фоминых,* В.В. Стегайлов

*Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия
Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия*

**email: fominykh.na@phystech.edu*

Переход Вервея в магнетите Fe_3O_4 послужил исходным прототипом концепции фазового перехода металл-изолятор [1]. Однако сохраняющиеся до сегодняшнего времени противоречия в значительной степени связаны с тем фактом, что современные экспериментальные работы характеризуют переход Вервея как переход полупроводник-полупроводник [2,3]. Показательным фактом в этой связи является существование альтернативных поляронной и зонной интерпретаций экспериментальных данных по оптической проводимости магнетита [4,5].

Расчеты электронной структуры магнетита из первых принципов долгое время были ограничены отсутствием точных экспериментальных данных по кристаллической структуре низкотемпературной фазы магнетита. На сегодня известно [6], что низкотемпературная фаза магнетита имеет Cs структуру и характеризуется тримеронным упорядочением. В данной работе для первопринципного моделирования мы применили метод расчета энергий поляронного хоппинга в рамках $\text{DFT}+U$, который ранее использовали для хромита [7] и феррита никеля [8].

Наряду с Cs структурой были рассмотрены и альтернативные варианты орбитально зарядового упорядочения: $P2_1$, $P4_12_12$, $P2/c$, $Pnma$, $Imma$. Полученные значения ширины запрещённой зоны лежат в диапазоне $E_g=0.55\text{--}1.12$ эВ, причем для структуры Cs значение $E_g=1.03$ эВ. Показано наличие тримеронного упорядочения для структур Cs , $P2/c$ и $Pnma$. Для структуры Cs воспроизведена структура так называемого “плохого” тримерона, чем может быть объяснено экспериментально наблюдаемое селективное легирование [9]. В рамках теории Гольштейна-Мотта и подхода Маркуса были получены энергии поляронного транспорта дырок и электронов ($E_a=0.13$ эВ и $E_a=0.16$ эВ, соответственно).

Таким образом, в данной работе представлена [10] гармонизирующая интерпретация вкладов зонного и поляронного транспорта, в рамках которой появляется возможность рассматривать вклады от транспорта малых поляронов и зонной проводимости не как альтернативные механизмы, а как два дополняющих друг друга механизма, проявляющихся в спектрах оптической проводимости при разных энергиях, что хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными [4,5] и позволяет взглянуть под другим углом на природу перехода Вервея.

Список литературы

- [1] N.F. Mott, Rev. Mod. Phys. **40**, 677 (1968).
- [2] D. Schrupp et al., Europhys. Lett. **70**, 789 (2005).
- [3] R. Prozorov et al., Mat. Res. Bulletin **167**, 112442 (2023).
- [4] S.K. Park, T. Ishikawa, Y. Tokura, Phys. Rev. B **58**, 3717 (1998).
- [5] L.V. Gasparov et al., Phys. Rev. B **62**, 7939 (2000).
- [6] M.S. Senn et al., Nature **481**, 173 (2012).
- [7] Н.А. Фоминых, В.В. Стегайлов, Письма в ЖЭТФ **117**, 857–862 (2023).
- [8] N.A. Fominykh et al., Comput. Mater. Sci. **246**, 113326 (2025).
- [9] E. Pachoud et al., Nature Comm. **11**, 1671 (2020).
- [10] N.A. Fominykh, V.V. Stegailov, Phys. Rev. B **111**, 115130 (2025).

Метод плотности состояний для расчёта магнитных свойств неупорядоченных систем

Н.А. Богословский,* П.В. Петров, Н.С. Аверкиев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

**email: nikitabogoslovskiy@gmail.com*

В последнее время активно изучаются неупорядоченные магнитные системы. Примером такой системы является полупроводник с магнитными примесями. Теоретически магнитные свойства чаще изучают для упорядоченных систем, или систем с искусственно введенным беспорядком. Для описания магнитных свойств систем с полностью случайным расположением атомов используют, как правило, феноменологическую модель Бхатта и Ли [1].

В нашей недавней работе [2] был предложен метод расчёта магнитных свойств неупорядоченных систем, основанный на вычислении плотности состояний системы $g(e, m)$ в зависимости от энергии и магнитного момента. Даже для систем с небольшим количеством спинов ($N = 16$) зависимость плотности состояний от энергии при фиксированном значении магнитного момента имеет близкое к нормальному распределение. При этом численно полученные среднее значение и дисперсия обменной энергии в зависимости от магнитного момента хорошо согласуются с аналитическими расчётами. Это позволяет применить методы статистической физики для расчёта свойств таких систем.

В настоящей работе мы применили метод плотности состояний для расчета магнитных свойств гейзенберговской спиновой цепочки и показали, что предложенный метод согласуется с известными теоретическими результатами, полученными другими методами. Далее мы применили метод плотности состояний для трёхмерной неупорядоченной системы спинов с антиферромагнитным взаимодействием и показали, что теоретически рассчитанная магнитная восприимчивость хорошо описывает примесную магнитную восприимчивость фосфора в кремнии в диапазоне температур от 1 до 10 К. Полученные результаты важны для теории неупорядоченного антиферромагнетизма, а так же позволяют лучше понять физику перехода металл-диэлектрик в легированных полупроводниках. По результатам работы подготовлена к печати статья [3].

Список литературы

- [1] R. N. Bhatt and P. A. Lee, Phys. Rev. Lett. **48**, 344 (1982).
- [2] N.A. Bogoslovskiy, P.V. Petrov and N.S. Averkiev, Phys. Rev. B **109**, 024436 (2024).
- [3] N.A. Bogoslovskiy, P.V. Petrov and N.S. Averkiev, <https://arxiv.org/abs/2412.07305>

Неаффинные деформации в аморфных системах

Д.А. Конюх,^{1,*} Д.В. Бабин,¹ И.О. Райков,¹ Я.М. Бельтюков¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: conyuh.dmitrij@yandex.ru

В настоящее время не ослабевает интерес к изучению природы аморфного состояния вещества и его микроскопической структуры. Наличие неоднородности в аморфных материалах существенно влияет на свойства колебательных возбуждений и локальной упругости таких систем. Данные свойства являются предметом активного исследования, поскольку определяют теплоемкость, теплопроводность, распространение фононов в аморфных полупроводниках и диэлектриках [1, 2].

Одним из важных упругих свойств аморфных твердых тел является существенная неоднородность (неаффинность) атомных смещений, возникающих под действием однородного внешнего механического напряжения. Масштаб неаффинных деформаций ξ зависит от природы аморфного вещества и в разных материалах оценивается десятками межатомных расстояний. На масштабе ξ , когда существенную роль играет пространственная неоднородность материала, деформации не могут быть описаны в рамках континуальной теории упругости, что усложняет их теоретическое исследование. Изучение свойств неаффинных деформаций особенно важно для физики нанокмполитов, поскольку в таких материалах размеры структурных элементов могут быть сопоставимы с масштабом ξ , что существенно изменяет макроскопические упругие свойства аморфных и полимерных материалов [3, 4].

С помощью теории случайных матриц мы исследуем корреляционные свойства неаффинных деформаций. Этот подход успешно применялся нами ранее для универсального теоретического описания бозонного пика и кроссовера Иоффе-Регеля между длиноволновыми акустическими фононами и диффузионными колебаниями [5]. В данной работе с помощью теории случайных матриц мы впервые получили аналитические выражения для корреляций локальных флуктуаций плотности вещества и корреляций локальных поворотов вещества на масштабе неоднородности структуры. Найденные корреляции имеют экспоненциально спадающую компоненту, масштаб ξ которой определяется неоднородностью среды, увеличивается с ростом силы беспорядка и оказывается сопоставимым с длиной Иоффе-Регеля.

Найденные теоретические зависимости подтверждены молекулярно-динамическим моделированием для аморфного SiO_2 , для которого масштаб неоднородности был оценен нами как $\xi \approx 9.5\text{\AA}$.

Полученные результаты имеют общий характер и могут быть применены для описания разных аморфных полупроводников и диэлектриков. В частности, построенная теория может быть применена для описания фононных мод нанокристаллов, включенных в аморфную матрицу, а также для описания их диэлектрических свойств.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-72-10083.

Список литературы

- [1] W. X. Zhou et al., *Advanced Functional Materials* **30**, 1903829 (2020).
- [2] J. Kang et al., *Chem. Rev.* **123**, 8859 (2023).
- [3] Y. M. Beltukov, D. A. Conyuh, I. A. Solov'yov, *Phys. Rev. E* **105**, L012501 (2022).
- [4] D. A. Conyuh, A. A. Semenov, Y. M. Beltukov, *Phys. Rev. E* **108**, 045004 (2023).
- [5] D. A. Conyuh, Y. M. Beltukov, *Phys. Rev. B* **103**, 104204 (2021).

Экситон-магнонное взаимодействие и перенос экситонов в ван-дер-ваальсовом антиферромагнетике CrSBr

З.А. Яковлев,^{1,*} М.М. Глазов¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: iakovlev.zakhar@gmail.com

В последние годы среди ван-дер-ваальсовых материалов выделяется класс магнитных систем. Ярким представителем таковых является слоистый антиферромагнетик CrSBr: полупроводник с шириной запрещенной зоны ~ 1.5 эВ, оптические свойства которого контролируются экситонами Ванье-Мотта с энергией связи, превышающей 100 мэВ [1,2]. Намагниченность монослоя CrSBr лежит в плоскости, а межслоевое взаимодействие носит слабый антиферромагнитный характер [3]. Недавние эксперименты показали, что распространение экситонов и магнонов взаимосвязаны: наблюдается увлечение экситонов магнонами, а при определенных условиях наблюдается экситонное пятно сжимается вместо диффузионного расплывания. Цель работы – построение микроскопической теории этих эффектов.

Выведен гамильтониан магнитной системы, включающий в себя короткодействующее обменное взаимодействие и дальнедействующее диполь-дипольное взаимодействие. Проведено вторичное квантование магнонов и определен их спектр, причем вблизи Г-точки групповая скорость одной из магнонных веток отрицательна.

Предложен новый – орбитальный – механизм электрон- и экситон-магнонного взаимодействия. Поскольку носители заряда в плоскостях монослоев поляризованы по спину вдоль намагниченности, в равновесии туннелирования между слоями нет. Туннелирование оказывается разрешено за счет скашивания намагниченности при возбуждении магнона (рис. 1), что приводит к взаимодействию электронных и магнитных возбуждений. Смешивание межслоевого и внутрислоевого экситона при наличии магнонов может приводить к образованию экситон-магнонного полярона. Определена энергия экситон-магнонного полярона в CrSBr. В рамках кинетического уравнения построена теория эффекта взаимного увлечения экситонов и магнонов. Показано, что “отрицательная диффузия” может являться следствием аномальной дисперсии магнонов.

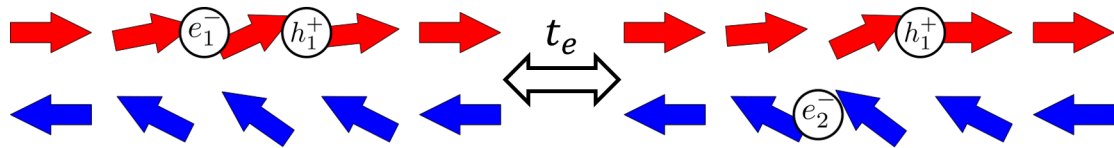


Рис. 1: Смешивание внутрислоевого и межслоевого экситонов при туннелировании электрона становится возможным благодаря скашиванию намагниченности при наличии магнона.

Работа поддержана грантом РНФ 23-12-00142.

Список литературы

- [1] N. P. Wilson, et. al., Nature Materials, **20**, 1657–1662, (2021).
- [2] F. Dirnberger, et. al., Nature, **620**, 533–537, (2023).
- [3] Y. J. Bae, et. al., Nature, **609**, 282–286, (2022).

Теория флеш-памяти на основе двумерного вигнеровского кластера (ДВК)

Мехрдад М. Махмудиан,^{1,2,*} М.М. Махмудиан,^{1,2} М.В. Энтин¹

¹ИФП СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*email: *m.makhmudian1@g.nsu.ru*

Система отталкивающихся электронов во внешнем удерживающем потенциале образует упорядоченную систему - вигнеровский кристалл (ВК). В свою очередь, флеш-память основывается на зарядке тонкого диэлектрика большим числом захваченных в нём электронов. Стремление к миниатюризации флеш-памяти делает актуальным рассмотрение конечного ДВК [1,2]. Целью данного доклада является изучение свойств ДВК и их влияния на характеристики флеш-памяти.

Кулоновское отталкивание электронов накладывает ограничения на возможность зарядки флеш-памяти. Электроны в диэлектрике захватываются на ловушки, число которых значительно превышает число электронов [3,4], что дает электронам значительную свободу для расположения, минимизируя кулоновскую энергию. Однако, в таких условиях ВК теряет упорядоченную структуру и начинает напоминать сильно коррелированную жидкость. Одним из факторов, способствующих разупорядоченности, является конечность системы.

С помощью компьютерного моделирования и аналитических методов были проведены исследования ДВК. Выполнен анализ термодинамических свойств системы, изучены корреляционные функции электронов и установлены критические значения концентраций электронов и ловушек, при которых происходит плавление ДВК. Полученные результаты будут применены для анализа экспериментов по зарядке флеш-памяти.

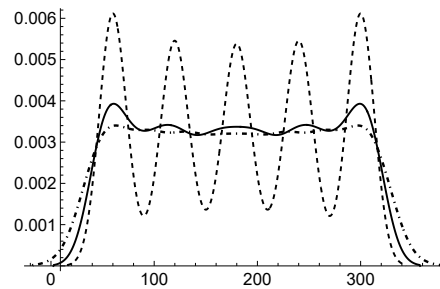


Рис. 1: Угловая корреляционная функция для ближайших соседей электронов для системы из 200 электронов без ловушек (пунктирная) и, захваченных на 1000 (штрих-пунктирная), 5000 (сплошная) ловушках. По горизонтали-угол в градусах, по вертикали - отн. ед.

Список литературы

- [1] М.М. Махмудиан, Мехрдад М. Махмудиан, М.В. Энтин, Письма в ЖЭТФ **115**, №10, 642–649 (2022).
- [2] Мехрдад М. Махмудиан, М.М. Махмудиан, М.В. Энтин, Физика твердого тела **65**, №10, 1769–1776 (2023).
- [3] С.С. Шаймеев, В.А. Гриценко, ЖЭТФ **139**, № 2, 550 (2011).
- [4] S.S. Shaimeev, V.A. Gritsenko, and Hei Wong, Applied Physics Letters **96**, 263510 (2010).

Термоэлектрические, топологические и гальваномагнитные свойства мультивейлевского полуметалла CoSi

Д.А. Пшенай-Северин,^{1,*} Ю.В. Иванов,¹ А.Т. Бурков¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: d.pshenay@mail.ru

Моносилицид кобальта и изоструктурные твердые растворы на его основе кристаллизуются в кубической нецентросимметричной структуре типа FeSi (пространственная группа $P2_13$, №198). Первоначально они исследовались как перспективные термоэлектрические материалы, обладающие высоким термоэлектрическим фактором мощности, превышающим фактор мощности известного термоэлектрика Bi_2Te_3 [1].

В последние годы интерес к данной группе материалов возрос в связи с изучением особенностей топологии их зонной структуры [2,3]. Было обнаружено, что они являются мультивейлевскими полуметаллами, в зонной структуре которых имеются многократные пересечения зон с линейным законом дисперсии и большим топологическим зарядом, равным 4. Особенности зонной структуры оказываются важными для объяснения целого ряда свойств этих материалов, таких как аномально большая для полуметаллов величина термоэдс CoSi [4], гигантское уменьшение низкотемпературной теплопроводности решетки в твердых растворах с замещением кобальта на железо [5]. Нетривиальная топология зонной структуры CoSi проявляется в необычном поведении магнитной восприимчивости и гальваномагнитных свойств. Продольное магнетосопротивление твердых растворов $Co_{1-x}Fe_xSi$ ($x \leq 6$ ат.%) удалось объяснить комбинацией эффектов слабой антилокализации и хиральной аномалии [6]. Теоретические исследования орбитальной магнитной восприимчивости показали, что восприимчивость мультивейлевских фермионов резко возрастает, когда химпотенциал приближается к энергии пересечения зон. При этом, в отличие от вейлевских полуметаллов, знак восприимчивости может меняться в зависимости от величины псевдоспина.

Имеется также ряд экспериментальных фактов, которые пока не нашли достаточно убедительного теоретического объяснения. Это, в частности, сильная зависимость свойств при отклонении состава от точной стехиометрии, необычный ферромагнитный отклик, который связывается с поверхностным ферромагнетизмом, необычные зависимости электросопротивления от температуры и магнитного поля при низких температурах в разбавленных сплавах $Co_{1-x}Fe_xSi$ ($x \leq 6$ ат.%).

Список литературы

- [1] M.I. Fedorov, V.K. Zaitsev. In *CRC Handbook of Thermoelectrics* (ed. D.M. Rowe), Chapter 27. CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [2] P. Tang, Q. Zhou, and Sh.-Ch. Zhang. *Phys. Rev. Lett.* **119**, 206402 (2017).
- [3] D.A. Pshenay-Severin, Y.V. Ivanov, A.A. Burkov, and A.T. Burkov. *J. Phys.: Cond. Matt.* **30**, 135501 (2018).
- [4] D.A. Pshenay-Severin, Y.V. Ivanov, A.T. Burkov. *J. Phys.: Cond. Matt.* **30**, 475501 (2018).
- [5] Y. Ivanov, A.A. Levin, S. Novikov et al. *Materials today. Energy.* **20**, 100666 (2021).
- [6] L. Schnatmann, M. Lammel, Ch. Damm et al. *Adv. Electron. Mater.* **8**, 2102081 (2021).

Генерация второй гармоники, индуцированная пространственной структурой излучения

А.А. Гуняга,^{1,*} М.В. Дурнев,¹ С.А. Тарасенко¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: gunyaga@coherent.ioffe.ru

Генерация второй гармоники (ГВГ) — ключевой эффект нелинейной оптики — представляет интерес как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения приложений. ГВГ наблюдается в структурах с нарушенной пространственной симметрией, и поэтому используется в качестве инструмента для исследования структурных неоднородностей, кристаллической симметрии, упаковки и степени скручивания двумерных и трёхмерных кристаллических структур [1].

Основные изученные механизмы ГВГ связаны с отсутствием центра инверсии в двумерных кристаллах и закрученных ван-дер-ваальсовых гетероструктурах [2], нарушением пространственной инверсии, вызванным протеканием электрического тока или волновым вектором фотона при наклонном падении излучения [3, 4], или краевыми эффектами в образцах конечного размера [5]. Естественно также ожидать, что ГВГ возможна и в изотропной среде при условии, что само излучение пространственно неоднородно. Яркими примерами такого структурированного излучения являются векторные пучки, состоящие из фотонов с различными поляризациями, или пучки закрученных фотонов, обладающих орбитальным угловым моментом [6].

В работе изучена ГВГ, индуцированная пространственной структурой падающего излучения в двумерном электронном газе. Показано, что структурированное излучение с интенсивностью, поляризацией или фазой, которые изменяются в плоскости электронного газа, приводит к генерации локальных электрических токов, осциллирующих на удвоенной частоте. Эти токи, в свою очередь, излучают вторичные волны на удвоенной частоте. Построена микроскопическая теория ГВГ в условиях внутризонного электронного транспорта, который реализуется для микроволнового и терагерцового диапазонов излучения в двумерных полупроводниках и вплоть до оптического диапазона в двумерных металлах. В рамках этой теории получено общее аналитическое выражение для тока на удвоенной частоте, возникающего в областях градиентов параметров падающего излучения. Теория применена для расчёта второй гармоники, индуцируемой векторными пучками и пучками закрученного излучения. В последнем случае показано, что вторичное излучение также является закрученным и переносит удвоенный орбитальный угловой момент [7].

Представленная работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00142.

Список литературы

- [1] L. Zhou, H. Fu, T. Lv et al., *Nanomaterials* **10**, 2263 (2020).
- [2] F. Yang, W. Song, F. Meng et al., *Matter* **3**, 1361 (2020).
- [3] J.B. Khurgin, *Appl. Phys. Letters* **67**, 1113 (1995).
- [4] M.M. Glazov, *JETP Letters* **93**, 366 (2011).
- [5] M.V. Durnev, S.A. Tarasenko, *Phys. Rev. B* **106**, 125426 (2022).
- [6] Б.А. Князев, В.Г. Сербов, *УФН* **188**, 508 (2018).
- [7] A.A. Gunyaga, M.V. Durnev, S.A. Tarasenko, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 156901 (2025).

Критическая динамика спин-бозонной модели

М. Г. Васин^{1,*}, А. А. Елистратов¹, С. В. Ремизов¹

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени*

Н. Л. Духова, Москва, Россия

**email: dr_vasin@mail.ru*

В представленной работе изучаются низкоэнергетические свойства спин-бозонной модели (SBM), которая описывает динамику $1/2$ -спина, связанного с бозонным термостатом, характеризующимся спектральной плотностью $f(\omega) \propto |\omega|^s$. Теоретическое описание построено в технике Келдыша–Швингера, основанной на представлении $1/2$ -спина майорановскими спинорами. Мы исследуем критическую динамику системы вблизи квантового фазового перехода, проанализировав систему уравнений ренормализационной группы. Предложенный теоретический подход является более универсальным, в отличие от подхода, основанного на квантово-классическом отображении [1], поскольку он применим для $0 < s \leq 1$. Мы показываем, что как в омическом случае $s = 1$, так и в субомическом $0 < s < 1$ в рассматриваемой модели наблюдается квантовый фазовый переход второго рода, а вычисленный критический показатель намагниченности согласуется с точным результатом гиперскейлинга и результатами численных расчётов [2, 3], $1/\delta = (1 - s)/(1 + s)$. Кроме того, получена зависимость критического значения константы спин-бозонной связи от температуры теплового резервуара.

Список литературы

- [1] A. J. Leggett, S. Chakravarty, A. T. Dorsey, M. P. A. Fisher, A. Garg, and W. Zwerger, Rev. Mod. Phys. **59**, 1 (1987).
- [2] M. Vojta, N.-H. Tong, and R. Bulla, Phys. Rev. Lett. **94**, 070604 (2005).
- [3] Y.-Z. Wang, S. He, L. Duan, and Q.-H. Chen, Phys. Rev. B **100**, 115106 (2019).

Фотогальванический эффект в напряженном графене

А.В. Снегирев,^{1,2*} В.М. Ковалев^{2,3}

¹*Институт Физики Полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия*

³*Новосибирский государственный технический университет, 630072, Новосибирск, Россия*

*email: komrad.snegirev2017@gmail.com

Фотогальванический эффект (ФГЭ) - это явление, при котором постоянный ток в образце возникает при воздействии переменного электрического поля, этот эффект имеет второй порядок по электрическому полю и описывается тензором третьего ранга, поэтому, из соображений симметрии ФГЭ может возникать только в средах без центра симметрии. Монослойный графен обладает инверсионной симметрией, поэтому при освещении монохроматическим светом, в нём не может возникать ФГЭ. Однако в недавних работах было показано, что асимметрия, необходимая для ФГЭ может быть индуцирована внешним возбуждением, например, освещением двумя пучками циркулярно-поляризованного света с разными частотами и противоположными поляризациями. [1,2] Этот метод также позволяет достичь селективного возбуждения только одной долины в графене. Кроме того, известно, что при одноосной деформации возникает наклон дираковских конусов в графене, причем знак наклона противоположный в К и -К долинах. [3]

Используя кинетическое уравнение Больцмана нами была разработана микроскопическая теория ФГЭ при облучении графена в режиме селективного заполнения только одной долины светом произвольной поляризации, с частотой, соответствующей внутризонным переходам. При учёте одноосной деформации и внешнего возбуждения, симметрия графена эффективно понижается, вследствие чего становятся возможны три вклада в ток: вклад, зависящий только от интенсивности падающего света, а также вклады, возникающие от действия линейной и круговой поляризации света. Были рассчитаны все три вклада в первом порядке по параметру наклона дираковского конуса. Вследствие того, что наклон имеет разный знак в разных долинах, полученные эффекты так же имеют долинный характер.

Данная работа была поддержана фондом развития теоретической физики и математики "Базис".

Список литературы

[1] Mrudul, M. S., et al. "Light-induced valleytronics in pristine graphene." *Optica* 8.3 (2021): 422-427.

[2] Ikeda, Yuya, Sota Kitamura, and Takahiro Morimoto. "Photocurrent induced by a bicircular light drive in centrosymmetric systems." *Physical review letters* 131.9 (2023): 096301.

[3] Goerbig, M. O. "Electronic properties of graphene in a strong magnetic field." *Reviews of Modern Physics* 83.4 (2011): 1193-1243.

Межподзонный спиновый резонанс в структурах на основе дихалькогенидов переходных металлов

К.К. Григорян,^{1,2,*} М.М. Глазов³

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: grigoryanchristine@phystech.edu

Монослои и бислои дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), имеют необычные электронные, оптические и транспортные свойства, связанные с особенностями кристаллической и зонной структурой, отсутствием центра инверсии и сильными кулоновскими эффектами. Такие монослои ДПМ как MoS_2 , MoSe_2 , WSe_2 и WS_2 являются прямозонными полупроводниками, запрещенная зона которых формируется в точках K и K' зоны Бриллюэна. Спиновое вырождение зон в этих точках снято благодаря отсутствию центра инверсии в группе симметрии кристалла и спин-орбитальному взаимодействию. Анализ показывает, что, несмотря на отсутствие центра инверсии, переходы между спиновыми подуровнями зоны проводимости в монослоях ДПМ возможны лишь за счет магнитного поля электромагнитной волны.

В данной работе показано, что в гетеробислоях ДПМ ситуация может быть иной, а межподзонные переходы – возбуждаться электрическим полем, т.е. возможен электрический дипольный спиновый резонанс [1]. С учетом того, что в ван-дер-ваальсовых гетероструктурах слои можно разворачивать и сдвигать друг относительно друга, для гетеробислоев возможны различные атомными укладки (регистры, registry), шесть из которых являются высокосимметричными и активно исследуются, см., например, [2,3]. Для всех шести атомных укладок, включая три H-типа, где слои развернуты друг по отношению к другу, и три R-типа, где разворота нет, был выполнен симметричный анализ правил отбора для переходов между спиновыми подзонами зоны проводимости. Определены укладки, для которых переходы между спиновыми подзонами возможны за счет переменного электрического поля.

В рамках $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ -метода теории возмущений с учетом спин-орбитального взаимодействия предложена микроскопическая модель электрического дипольного спинового резонанса в гетеробислоях ДПМ.

Список литературы

[1] Э. И. Раппа, Свойства полупроводников с петлей экстремумов. I. Циклотронный и комбинационный резонанс в магнитном поле, перпендикулярном плоскости петли, ФТТ **2**, 1224 (1960).

[2] Michael Förg, Leo Colombier, Robin K. Patel, et al., Cavity-control of interlayer excitons in van der Waals heterostructures, Nature Comms. **10**, 3697 (2019).

[3] Shen Zhao, Zhijie Li, et al., Excitons in mesoscopically reconstructed moiré heterostructures, Nature Nano. **18**, 572 (2023).

Термоэлектрический вклад в эффект "храповика" в вязкой электронной жидкости

С.О.Поташин^{1,*}, Голуб Л.Е², В.Ю.Качоровский,¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

²Terahertz Center, University of Regensburg, 93040 Regensburg, Germany

*email: sergeypotashin@gmail.com

Одним из активно развивающихся направлений физики конденсированного состояния является электронная гидродинамика (ГД). Особое внимание уделяется стационарному потоку вязкой электронной жидкости в системах конечного размера. Этот поток существенно зависит от граничных условий, т.е. от свойств границ, которые, по сути, не известны. Поэтому представляет интерес поиск объёмных эффектов, позволяющих проследить переход в ГД режим. Ранее мы показали [1], что такой переход может наблюдаться в объёмных оптических экспериментах по конверсии переменного электрического поля в dc ток в пространственно-модулированных системах, обладающих встроенной асимметрией по отношению к пространственной инверсии – так называемый эффект «храповика» (ratchet effect). Ключевое отличие ГД режима конверсии от более изученного режима дрейф-диффузия (ДД) состоит в существенно различной высокочастотной зависимости генерируемого dc тока: медленная зависимость, $j_{dc} \propto 1/\omega^2$ в ДД режиме и гораздо более резкая зависимость, $j_{dc} \propto 1/\omega^6$, в ГД режиме. Оба режима были идентифицированы в эксперименте [1].

В работе [1] мы не учитывали термоэлектрические эффекты, которые были отброшены в предположении, что фононный разогрев слабый: $\Gamma = E_F \tau / T \tau_{ph} \gg 1$ (τ_{ph} и τ времена электрон-фононных и -примесных столкновений, соответственно). В настоящей работе мы подробно изучаем роль этих эффектов, которые становятся доминирующими при $\Gamma \ll 1$. В этом случае, разогрев становится существенным и приводит к квадратичной высокочастотной асимптотике, $j_{dc} \propto 1/\Gamma \omega^2$, даже в ГД режиме. Кроме того, при малых Γ зависимость отклика от частоты становится знакопеременной и возникают асимметричные резонансы Фано (Рис. 1а).



Рис. 1: а) Зависимость фототока храповика от безразмерной частоты $\Omega = \omega \tau$ (здесь $\Omega_q = \omega_q \tau$, а ω_q -плазменная частота); б) Частотная зависимость потока направленных плазмонов.

Не менее важным результатом настоящей работы является анализ роли электронной вязкости. Конечная вязкость подавляет плазменный резонанс, но неожиданно усиливает пик Друде из-за интерференционной природы эффекта храповика. Помимо этого, вязкость приводит к появлению направленного потока плазмонов (directed plasmons), который, также как и dc ток, имеет резонанс при $\Omega = \Omega_q$ (Рис. 1б)

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 24-62-00010.

Список литературы

[1] E. Mönch, et al., Phys.Rev.B 105, 045404 (2022)

Плазменная неустойчивость в латеральном плазменном кристалле

И.В. Горбенко,^{1,*} В.Ю. Качоровский¹

¹ФТИ им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

*email: gorbenko.ilya.v@gmail.com

В 2D электронных системах существует множество механизмов возникновения индуцированной током плазменной неустойчивости [1,2,3,4]. В данной работе подробно изучена неустойчивость в латеральном плазменном кристалле (ЛПК), предсказанная ранее в работе [3]. Простейшей моделью ЛПК является набор чередующихся полосок с разными концентрациями $N_{1,2}$ и плазменными скоростями $s_1 \propto \sqrt{N_1}$ и $s_2 \propto \sqrt{N_2}$ ($s_1 > s_2$). При пропускании тока через ЛПК возникают две скорости дрейфа V_1 и V_2 ($J_{dc} = eN_{1,2}V_{1,2} \propto s_{1,2}^2 V_{1,2}$, т.е. $V_1 < V_2$). Также, наличие двух областей, через которые протекает постоянный ток приводит к наличию четырем видам плазменных волн с волновыми векторами $q_{1,2}^\pm$ (в отсутствии тока $q_{1,2}^+ = -q_{1,2}^-$). В работе получено несколько принципиально новых результатов по сравнению с работой [3]: (i) явная зависимость собственных частот от постоянного тока в режимах слабой и сильной связи для нулевого квазиволнового вектора ЛПК (о переходе между режимами см. [5]); (ii) общая фазовая диаграмма неустойчивости; (iii) выявлено, что наибольший инкремент неустойчивости достигается при скорости дрейфа V_1 меньшей, чем максимальная плазменная скорость s_1 ; (iv) обнаружено новое чисто мнимое неустойчивое решение ($\text{Re}[\omega] = 0$), которое реализуется в интервале дрейфовых скоростей от $V_2 = s^*$ до $V_1 = s_1$ [$s^* \approx s_2 + 3(s_1 - s_2)/2$ в приближении слабой связи и $L_1 = L_2$].

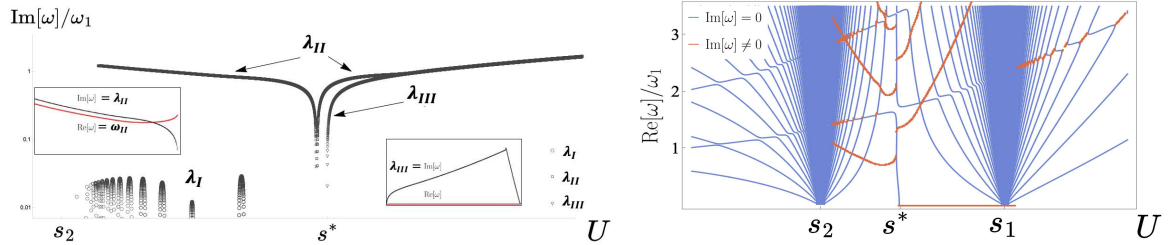


Рис. 1: Зависимость инкрементов неустойчивости $\lambda_I, \lambda_{II}, \lambda_{III}$ (слева) и вещественной части решений (справа) от эффективной скорости $U = (s_1^2 V_1)^{1/3} = (s_2^2 V_2)^{1/3}$ в наиболее интересной области, когда $s_2 < V_2$ и одновременно $s_1 > V_1$. В этом «промежуточном» режиме обнаружено три вида неустойчивых решений: неустойчивость типа черенковой $\omega = \omega_I + i\lambda_I$ с малым инкрементом ($\omega_I \gg \lambda_I$), новый вид неустойчивых решений с большим инкрементом $\omega = \omega_{II} + i\lambda_{II}$ ($\lambda_{II} > \omega_{II}$), а также чисто мнимое решение $\omega = i\lambda_{III}$. При этом увеличение тока в область $s_1 < V_1$ и $s_2 < V_2$ сохраняет только первый тип неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-62-00010.

Список литературы

- [1] M. Dyakonov, M. Shur, Physical Review Letters **71**, 2465 (1993).
- [2] S.A. Mikhailov, Physical Review B **58**, 1517 (1998).
- [3] V. Kachorovskii, M. Shur, Applied Physical Letters **100**, 232108 (2012).
- [4] A. Petrov, D. Svintsov, V. Ryzhii, M. Shur, Physical Review B **95**, 045405 (2017).
- [5] I. Gorbenko, V. Kachorovskii, Physical Review B **110**, 155406 (2024).

Обратный эффект Фарадея в нанокольце с дираковскими фермионами

В. Ю. Мыльников,^{1,*} В. Ю. Качоровский¹

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Россия

*email: vm@mail.ioffe.ru

Двумерные материалы, такие как однослойный и двухслойный графен, а также CdTe/HgTe квантовые ямы [1], активно изучаются уже более пятнадцати лет. Объемные и краевые электронные состояния в рассматриваемых материалах описываются дираковским спектром. В данной работе мы рассматриваем нанокольцо из дираковского материала и изучаем возбуждение постоянного dc тока, I_{dc} , под воздействием циркулярно-поляризованного излучения с частотой ω , падающего нормально на образец — так называемый обратный эффект Фарадея.

Поскольку возбуждается образец конечного размера, в системе имеется размерное квантование и зависимость $I_{dc}(\omega)$ имеет ряд резонансов. Ранее этот эффект был изучен для замкнутого нанокольца, в котором находятся обычные (не дираковские) 1D электроны с параболическим спектром и выделены режимы слабой и сильной связи с излучением [2]. В настоящей работе, результаты [2] обобщены на случай дираковских фермионов и показано, что дираковский случай существенно интереснее по ряду причин. Так, при увеличении амплитуды внешнего электрического поля, характерная энергия связи электронов с излучением становится сравнима с расстоянием между энергетическими уровнями, и резонансы начинают сливаться (Рис. 1). В режиме сильной связи в зависимости тока от частоты возникает один резкий пик, высота которого степенным образом зависит от интенсивности света и оказывается параметрически больше, чем у аналогичного пика в параболическом спектре.

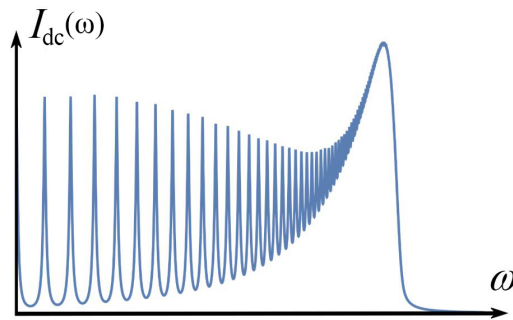


Рис. 1: Зависимость dc тока от частоты падающего излучения.

Так как обратный эффект Фарадея не связан с поглощением фотонов или нагревом, полученные результаты могут быть полезны при создании практических приложений в области спинтроники, а также для фундаментальных и прикладных исследований в области электроники и оптоэлектроники.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-62-00010.

Список литературы

- [1] M. Konig, et al., Science. 2007. **318**(5851), 766-770 (2007).
- [2] K. L. Koshelev, V. Yu. Kachorovskii, and M. Titov, Phys. Rev. B. **92**(23), 235426 (2015).

Генерация второй гармоники на оптических резонансах диэлектрических метаповерхностей

Е.С. Вяткин*, С.А. Тарасенко

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

*email: vyatkin.egor@mail.ioffe.ru

Локальное увеличение амплитуды электромагнитного поля вблизи метаповерхности на оптических резонансах способствует усилению нелинейных оптических эффектов, таких как генерация второй гармоники. Данные эффекты в настоящее время активно изучаются экспериментально и теоретически [1, 2]. Теоретические работы посвящены главным образом моделированию распределения электрического поля и определению параметров оптических резонансов Фано из численного расчета.

В данной работе представлена аналитическая теория усиления генерации второй гармоники на оптических резонансах метаповерхностей. Рассмотрены механизмы генерации второй гармоники, связанные как с отсутствием центра инверсии в среде, так и с неоднородным распределением электромагнитного поля [3].

Простейшей метаповерхностью является тонкий диэлектрический слой с латеральной модуляцией диэлектрической проницаемости, рис. 1(a). В такой системе падающая волна может возбуждать волноводные моды в диэлектрическом слое. Резонансное возбуждение волноводной стоячей волны при нормальном падении света многократно усиливает эффект генерации второй гармоники в нелинейном слое, расположенном вблизи метаповерхности. Величина усиления $Q \sim \omega_0^2 \Gamma_0^2 / (\Gamma_0 + \Gamma)^4$ определяется резонансной частотой ω_0 , радиационным $1/\Gamma_0$ и нерадиационным $1/\Gamma$ временами жизни волноводной моды. Эффект дополнительно усиливается при небольшом отклонении угла падения света от нормали, когда дополнительно возбуждается темная мода, слабо взаимодействующая со светом, рис. 1(b).

Работы выполнены при поддержке гранта РНФ № 23-12-00142.

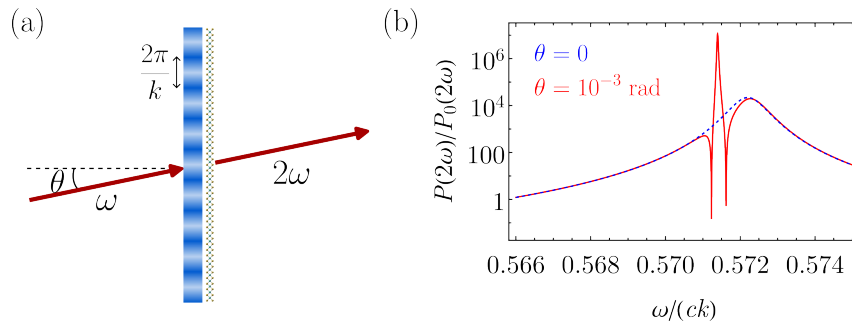


Рис. 1: (a) Генерация второй гармоники в 2D материале с нелинейной восприимчивостью вблизи метаповерхности. (b) Спектр усиления генерации второй гармоники.

Список литературы

- [1] T. Ning et al., Giant enhancement of second harmonic generation from monolayer 2D materials placed on photonic moiré superlattice. *Nanophotonics* **12**, 4009 (2023).
- [2] K. Koshelev et al., Subwavelength dielectric resonators for nonlinear nanophotonics, *Science* **367**, 288 (2020).
- [3] A.A. Gunyaga, M.V. Durnev, S.A. Tarasenko, Second harmonic generation due to spatial structure of radiation beam, arXiv:2408.03454.

Спиновая прецессия электронов в продольном и поперечном магнитном поле при случайной ориентации квантовых точек и анизотропии g -фактора.

А.А. Головатенко,^{1,*} Д.А. Луцевич¹

¹*ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

**email: sasha.pti@mail.ru*

Изучение спиновой прецессии в ансамблях коллоидных квантовых точек (нанокристаллов), начавшись более 20 лет назад с нанокристаллов CdSe [1], и по сей день остается актуальным [2,3]. В нашей работе мы показываем, что в связи с различной пространственной ориентацией коллоидных нанокристаллов, а также наличием анизотропии тензора g -фактора электрона [3], спиновая динамика данных систем содержит дополнительные свойства, отсутствующие в эпитаксиальных квантовых точках, изучавшихся теоретически в работе [4].

В нашей работе мы рассматриваем отрицательно заряженные двумерные нанопластины (наноплателеты) CdSe с различными типами пространственного распределения оси анизотропии в ансамбле. Нами теоретически исследована зависимость спиновой поляризации ансамбля, создаваемой циркулярно поляризованным импульсом накачки, от скважности и площади импульсов накачки. Приводится анализ временных и частотных зависимостей для сигнала спиновой прецессии в поперечном (геометрия Фойгта) и продольном (геометрия Фарадея) магнитном поле.

В результате установлено, что с увеличением эффективной площади импульса накачки в случайно ориентированном ансамбле достигается инверсия знака создаваемой спиновой поляризации. Также показано, что при возбуждении π -импульсом накачки частота ларморовой прецессии для случайно ориентированного ансамбля в поперечном магнитном поле определяется поперечной компонентой электронного g -фактора. Как в поперечном, так и в продольном магнитном поле, наличие случайной ориентации нанопластинок вместе с анизотропией электронного g -фактора дают дополнительный вклад в скорость спиновой дефазировки ансамбля. Исследовано соотношение данного вклада с вкладом, связанным с дисперсией электронного g -фактора в ансамбле.

Исследование выполнено за счет гранта №23-12-00300 Российского научного фонда.

Список литературы

- [1] J.A. Gupta et al., Phys. Rev. B **66**, 125307 (2002).
- [2] S.R. Meliakov et al., Nanomaterials **13**, 3077 (2023).
- [3] E. Kirstein et al., Nat. Commun. **14**, 699 (2023).
- [4] I.A. Yugova, et al., Phys. Rev. B **80**, 104436 (2009).

Конкуренция прыжков и квантового обратного действия в спиновой динамике локализованных электронов

А.Л. Зибинский,^{1,*} Д.С. Смирнов¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: zibinskiy.coherent@mail.ioffe.ru

Магнитолевые зависимости спиновой поляризации – кривые Ханле и восстановления спиновой поляризации (далее PR) – один из наиболее важных методов экспериментального изучения спиновой динамики локализованных электронов. По их амплитудам и ширинам можно определять времена спиновой релаксации и силу сверхтонкого взаимодействия [1]. Несмотря на теоретический учёт множества факторов, влияющих на спиновую динамику, экспериментальные результаты зачастую драматически не укладываются в имеющиеся теоретические модели [2]. В этой работе мы описали параметры кривых Ханле и PR в условиях конкуренции квантового обратного действия, неизбежно вызываемого ориентацией и измерениями спинов [3], и прыжков электронов между центрами локализации [1], как показано на рис. 1(а).

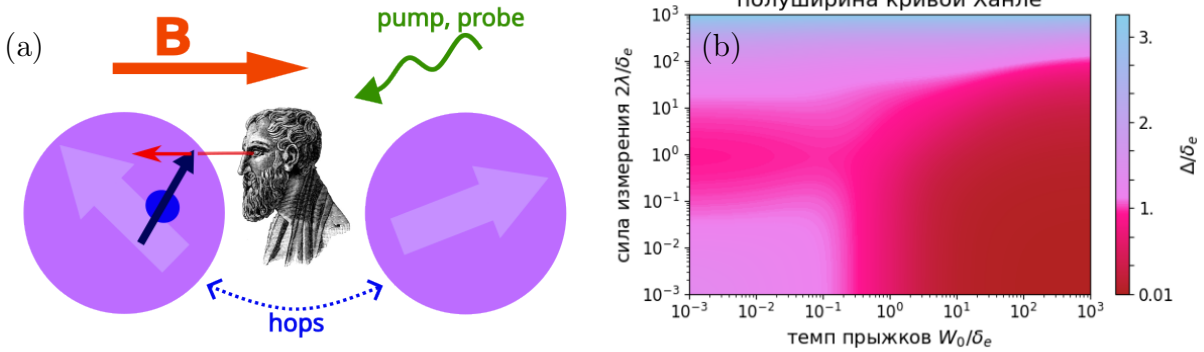


Рис. 1: (а) Электроны, прыгающие между квантовыми точками при непрерывном измерении. (б) Зависимость полуширины кривой Ханле от темпа прыжков и силы измерения.

Мы рассмотрели равновероятные прыжки электронов между центрами локализации в условиях анизотропной спиновой релаксации, обусловленной квантовым обратным действием. Соотношения между темпом прыжков, силой измерения и сверхтонким взаимодействием предполагаются произвольными. Получено аналитическое решение системы блоховских уравнений для геометрий Фохта и Фарадея. В ряде предельных случаев указаны простые выражения для продольного и поперечного времени релаксации, амплитуд и полуширин кривых Ханле и PR.

В результате построена модель, охватывающая параметрически более мощное множество возможных магнитолевых зависимостей спиновой поляризации, и позволяющая описать не объяснимые ранее экспериментальные данные.

Список литературы

- [1] M. M. Glazov, *Electron and Nuclear Spin Dynamics in Semiconductor Nanostructures* (Oxford University Press, 2018).
- [2] D.S. Smirnov *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 235413 (2020).
- [3] N.V. Leppenen, D.S. Smirnov, Nanoscale **14**, 13284 (2022).

Восстановление оптической ориентации спинов ионов марганца и подавление туннелирования в первом возбужденном состоянии в кубическом ZnSe

К.А. Барышников,^{1,*} Н.С. Аверкиев¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: barysh.1989@gmail.com

Основное состояние 6A_1 ионов марганца в II-VI кристаллах соответствует половине заполненной d -оболочке иона и описывается полным спином $5/2$. Резонансный оптический переход приводит к перевороту одного из электронных спинов на d -оболочке за счет спин-орбитального взаимодействия, что в кубическом кристалле приводит к заселению первого возбужденного состояния симметрии 4T_1 , соответствующего трехкратному орбитальному вырождению и полному спину $3/2$ [1]. Такие переходы в кристалле (Cd,Mn)Te с большой концентрацией марганцев (порядка 40%) можно описать в терминах полного углового момента основного и возбужденного состояний отдельного иона марганца [2], а также с учетом разделения кубических осей искажениями Яна-Теллера в его возбужденном состоянии [3], что приводит к оптической ориентации спинов марганца в кубическом кристалле (Cd,Mn)Te ниже 8 К, когда происходит переход в фазу спинового стекла ионов марганца.

В кубическом ZnSe с малой концентрацией марганцев порядка 1% при 1.5 К вклад оптической ориентации в фотолюминесценцию (ФЛ) иона марганца в нулевом магнитном поле не наблюдалось. Тем не менее, недавно было обнаружено появление такого вклада в магнитных полях до 6 Тл в геометрии Фарадея, достигающего величины порядка 3%. Более того, экспериментально обнаружена сильная угловая зависимость поляризации ФЛ при повороте ориентаций осей кристалла в эксперименте. Для объяснения этих эффектов в данной работе предложена теория оптических внутрицентровых переходов в ионе марганца в кубическом ZnSe, учитывающая наличие сильного эффекта Яна-Теллера, связывающего орбитальные степени свободы центра в возбужденном состоянии с локальными колебаниями ближайшего атомного окружения e -симметрии, и спин-орбитального взаимодействия, приводящего к выстраиванию спинов вдоль осей ян-теллеровских искажений. Предложена модель спиновой релаксации центра в возбужденном состоянии, позволяющая заработать восстановление оптической ориентации центра в магнитном поле за счет селективного возбуждения различных ян-теллеровских искажений и подавления туннелирования между ян-теллеровскими минимумами. В работе обсуждается нетривиальная угловая зависимость поляризации ФЛ, связанная с зависимостью скоростей оптических переходов и выравнивания заселенностей спинов от ориентации ян-теллеровских искажений.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект – 23-12-00205).

Список литературы

- [1] V.F. Agekyan, Phys. of the Solid State **44**, 2013 (2002).
- [2] K.A. Baryshnikov et al., Phys. Rev. B **92**, 204202 (2015).
- [3] K.A. Baryshnikov, J. Phys.: Condens. Matter **32**, 365503 (2020).

Магнитоиндуцированные фототоки в центросимметричных квантовых ямах

М. А. Жигалов, Г. В. Будкин, С. А. Тарасенко
ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
*email: mzhigalov089@mail.ru

Генерация фототока при однородном освещении структуры с центром пространственной инверсии возможна за счёт эффекта увлечения — передачи импульса фотонов электронам. Такие эффекты широко исследовались экспериментально и теоретически в двумерных системах при наклонном падении излучения [1].

В данной работе исследован эффект увлечения электронов фотонами в геометрии нормального падения излучения на двумерную структуру. Показано, что генерация электрического тока в плоскости двумерной системы за счёт фотонного увлечения возможна и при нормальном падении излучения при наличии постоянного магнитного поля $\mathbf{B}_0$ в плоскости структуры. Феноменологическое выражение для плотности фототока имеет вид

$$j_\alpha = \chi_{\alpha\beta\gamma\delta} B_{0,\beta} E_\gamma E_\delta^* q_z,$$

где q_z — проекция волнового вектора на нормаль квантовой ямы, $\mathbf{E}$ — комплексная амплитуда электрического поля излучения, индексы $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ пробегает значения x, y .

Выявлены механизмы и разработана микроскопическая теория такого магнитоиндуцированного квантово-размерного эффекта увлечения электронов фотонами для внутризонного электронного транспорта под действием поля терагерцового спектрального диапазона. Получены аналитические выражения для тензора $\chi_{\alpha\beta\gamma\delta}$, определяющего величину и направление фототока. Продемонстрировано, что действие внешнего статического магнитного поля и осциллирующего магнитного поля излучения вызывает когерентные (согласованные с электрическим полем излучения) модуляции времён релаксации электронного газа, обусловленные модификацией функций размерного квантования. Совместное действие модуляции рассеяния и переменной силы, создаваемой электрическим полем волны, приводит к перераспределению электронов в $\mathbf{k}$ -пространстве и генерации направленного электрического тока. Вычислены частотные зависимости токов увлечения. Токи увлечения, индуцированные неполяризованным или линейно поляризованным излучением, имеют максимум при нулевой частоте и асимптотику ω^{-2} при больших частотах. Ток увлечения, создаваемый циркулярно поляризованной волной, пропорционален частоте излучения ω при малых частотах, имеет максимум на частоте обратного времени релаксации импульса τ_p^{-1} и спадает как ω^{-1} при больших частотах. Исследовано также влияние распределения рассеивающих центров относительно центра квантовой ямы на величину фототока и определен дизайн структуры, при котором эффект увлечения максимален.

Список литературы

[1] S. Stachel, G.V. Budkin, U. Hagner, V.V. Bel'kov, M.M. Glazov, S.A. Tarasenko, S.K. Clowes, T. Ashley, A.M. Gilbertson, and S.D. Ganichev, Phys. Rev. B **89**, 115435 (2014).

Резонансное приближение для составных систем фотоники

Н.А. Гиппиус*

Сколковский институт науки и технологий, Большой бульвар, 30, Москва, 121205, Россия

*E-mail: n.gippius@skoltech.ru

Фотонно-кристаллические слои представляют собой слоистые структуры с периодической модуляцией диэлектрической проницаемости в плоскости слоёв и могут быть изготовлены с использованием хорошо развитых микро и нано технологий. Возможность управления дисперсионными свойствами этих структур за счёт модификации архитектуры элементарной ячейки открывает широкие возможности для применения этих систем в качестве базовых элементов фотоники.

Модальный метод Фурье (FMM) (или метод матрицы рассеяния) является очень эффективным инструментом для изучения оптических свойств многослойных вертикально-инвариантных периодических структур. Однако для задач, требующих интегрирования по волновым векторам в плоскости структуры, необходимость многочисленных однотипных расчётов снижает эффективность этого метода.

В этой работе рассматривается возможность существенного ускорения расчётов оптических свойств фотонных структур за счёт использования резонансного приближения для матрицы рассеяния. Для структур допускающих разбиение на две нерезонансные подсистемы оказывается возможным построение регулярной аппроксимации положений резонансов составной системы на основе построения эффективного Гамильтониана, все элементы которого определяются прямым расчётом в ограниченном числе точек пространства параметров и в дальнейшем допускают достаточно точную аппроксимацию в более широкой области параметров. Это приближение позволяет конструктивно выделить резонансную часть матрицы рассеяния и построить регулярные схемы аппроксимации для расчёта оптических свойств этих структур, не требующих многочисленных и ресурсоёмких вычислений.

Рассматриваемый подход позволяет описывать как положения резонансов, так и оптические свойства в их окрестности. Рассчитанные коэффициенты отражения по стандартной (а) и новой (б) методикам приведены на Рис.1, (с) - различие в логарифмическом масштабе.

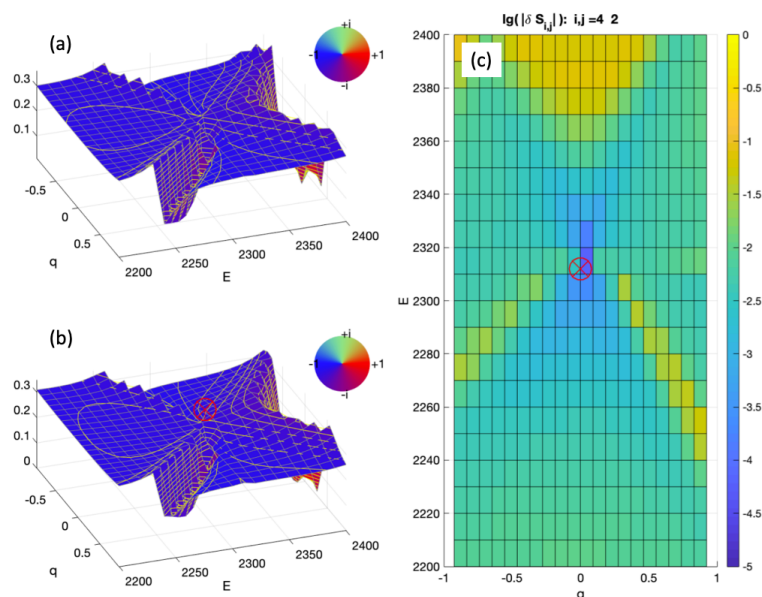


Рис. 1. Рассчитанный коэффициент отражения на основе (а) стандартного метода (441 S-матрицы), (б) предлагаемого метода (4 S-матрицы) и (с) - различие в логарифмическом масштабе.

Литература

1. S.G.Tikhodeev, A.L. Yablonskii, E. A. Muljarov, N.A. Gippius, and T. Ishihara. " *Physical Review B* 66, no. 4 (2002): 045102.
2. N. A. Gippius, T.Weiss, S.G. Tikhodeev, and H.Giessen. *Optics Express* 18, no. 7 (2010): 7569-7574.
3. I.M. Fradkin, S.A. Dyakov, and N.A. Gippius, *Physical Review B* 99, no. 7 (2019): 075310.