



ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Санкт-Петербург

СОВЕЩАНИЕ ПО ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

17 – 19 мая 2023

Совещание по теории твердого тела

17 – 19 мая 2023, 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 полупроводников и теории твердого тела, которые проходили в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 2009, 2016, 2019 и 2021 годах, и регулярных Совещаний по теории полупроводников, проводимых под руководством Л.В. Келдыша и В.И. Переля в прошлом. Совещание 2023 года приурочено к 100-летию со дня рождения Г.Е. Пикуса.

Сайт Совещания: www.ioffe.ru/coherent/sstm2023

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)
Л.Е. Голуб (ФТИ, Санкт-Петербург)
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
К.Ю. Голеницкий
А.В. Коротченков
А.В. Пошакинский
Д.С. Смирнов
С.А. Тарасенко

Приглашенные доклады

Фотоэмиссия электронов из полупроводников с отрицательным и положительным электронным сродством

В.Л. Альперович,^{1,2,*} Д.М. Казанцев,^{1,2} В.С. Хорошилов^{1,2}

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

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*email: alper@isp.nsc.ru

Фотоэмиссия широко используется для исследования электронной структуры твердых тел и как физическая основа приборов – фотоумножителей, электронно-оптических преобразователей, источников ультра-холодных и спин-поляризованных электронов. В методе фотоэмиссионной спектроскопии энергия квантов излучения и кинетическая энергия эмитированных электронов, как правило, значительно превышают работу выхода и электронное сродство. При этом энергетические и угловые распределения электронов, эмитированных в вакуум «баллистически», без рассеяния, несут информацию о заполненных электронных состояниях. В фотоэмиссионных приборах эмиссию вызывают фотоны с малой энергией, порядка ширины запрещенной зоны, благодаря возможности снижения потенциального барьера на поверхности до состояния с отрицательным электронным сродством (ОЭС), когда уровень вакуума лежит ниже дна зоны проводимости в объеме полупроводника. Эмиссия из ОЭС-фотокатодов несет информацию, главным образом, о релаксации фотоэлектронов по незанятым состояниям зоны проводимости. При переходе от отрицательного к положительному электронному сродству (ПЭС), квантовый выход фотоэмиссии уменьшается, однако поверхности с относительно небольшими значениями ПЭС привлекают внимание в связи возможным использованием фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии для повышения эффективности солнечных элементов.

Несмотря на многолетние исследования и прикладные разработки, многие вопросы физики фотоэмиссии остаются непонятыми, а параметры приборов все ещё далеки от теоретически возможных. Как происходит переход электрона через границу кристалла с вакуумом, другими словами, превращение квазичастицы с блоховской волновой функцией в свободный электрон? Как правильно рассчитать вероятность этого перехода? Какую роль играют процессы рассеяния энергии, импульса и спина при переходе электронов через границу раздела с вакуумом? Известно, что скачок массы электрона, от эффективной массы в полупроводнике до массы свободного электрона в вакууме, должен приводить к значительному сужению углового распределения эмитируемых электронов. Однако убедительных экспериментальных доказательств такого сужения при эмиссии из полупроводников с ОЭС пока не получено, а влияние скачка массы на эмиссию остается предметом дискуссий. В данной работе, на примере арсенида галлия с адсорбированными слоями цезия и кислорода, рассмотрено влияние скачка массы на фотоэмиссию и фотонно-усиленную термоэлектронную эмиссию из полупроводников с ОЭС и ПЭС. Показано, что измерение угловых и энергетических распределений электронов, эмитированных из полупроводников с ПЭС, может дать более надежное доказательство проявления скачка массы, по сравнению с состоянием с ОЭС. Предложено объяснение экспериментально наблюдавшейся малой вероятности выхода электронов в вакуум при однократном соударении с поверхностью кристалла в контексте вопроса о применимости метода эффективных масс для описания эмиссии электронов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 23-72-30003, <https://rscf.ru/project/23-72-30003/>.

Скирмионы и скирмионные кристаллы в магнитных тонких пленках

Д.Н. Аристов,^{1,2*} В.Е. Тимофеев^{1,3}

¹НИИЦ “Курчатовский Институт”, Петербургский Институт Ядерной Физики,
Гатчина 188300, Россия

²Санкт-Петербургский Государственный Университет, 7/9 Университетская
наб., 199034 Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский Электротехнический Университет “ЛЭТИ”, 197376
Санкт-Петербург, Россия

*email: aristov@thd.pnpi.spb.ru

Магнитные скирмионы (МС) представляют собой топологически защищенные конфигурации локальной намагниченности, наблюдаемые, например, в нецентросимметричных магнетиках с взаимодействием Дзялошинского-Мория. В тонких пленках МС упорядочиваются в двумерные скирмионные кристаллы (СкК) [1]. Закрученный характер скирмионных конфигураций усложняет анализ элементарных возбуждений (магнонов) в таких системах. Мы разрабатываем новый подход, позволяющий изучать динамику магнонов в присутствии топологически нетривиального основного состояния [2]. Этот подход основан на сочетании квазиклассического метода и метода стереографической проекции для локальной намагниченности.

Равновесная конфигурация СкК на плоскости определяется в терминах функции комплексной переменной. Мы показываем численно, что стереографическая функция СкК в популярной модели Бака-Йенсена достаточно точно соответствует простой сумме стереографических образов отдельных скирмионов. Рассматривая малую вариацию стереографической функции, мы определяем нормальные моды колебаний в гармоническом приближении. Мы вычисляем спектр возбуждений СкК и показываем, что возникающие зоны в кристалле можно классифицировать по типам деформации отдельных скирмионов: дилатационные, эллиптические деформации и т. д. Обсуждаются эволюция спектра магнонов с изменением магнитного поля, а также топологические свойства зонной структуры, т.е. кривизна Берри и числа Черна. Предсказываются особенности в эксперименте по магнитному резонансу в СкК.

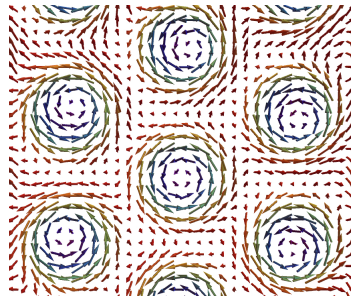


Рис. 1: Распределение намагниченности в СкК.

Список литературы

- [1] Naoto Nagaosa and Yoshinori Tokura, Nature Nanotechnology, 8, 899 (2013)
- [2] V.E. Timofeev and D.N. Aristov, Physical Review B, 105, 024422 (2022)

Упругие свойства полимерных нанокомпозитов

Д.А. Конюх,¹ А.А. Семенов,¹ Я.М. Бельтюков^{1,*}

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

*email: ybeltukov@gmail.com

Полимерные нанокомпозиты привлекают значительное внимание благодаря своим уникальным свойствам и большому потенциалу в качестве новых материалов [1]. Экспериментальные исследования показали, что за счет наноразмерных включений полимерные нанокомпозиты могут обладать заданными механическими, электрическими и термическими свойствами [2]. Установлено, что добавление наночастиц в полимер даже в небольших концентрациях может приводить к значительным изменениям макроскопических упругих модулей [3–5].

Для изучения влияния наночастиц на упругие свойства полимеров были проведены численные и теоретические исследования. В рамках моделирования методом молекулярной динамики были изучены упругие свойства полистирола с включенной в него наночастицей SiO_2 [6]. С помощью анализа локальных флуктуаций плотности в термодинамическом равновесии были определены локальные упругие свойства полистирола. Было показано, что вокруг наночастицы имеется экспоненциально спадающая оболочка, в которой упругие модули полистирола выше, чем вдали от наночастицы. Характерный размер данной оболочки составил 1.4 нм. При этом в данном объеме плотность и другие структурные свойства полистирола соответствовали полистиролу вдали от наночастицы.

Полученные результаты говорят о неприменимости классической теории упругости на масштабах нескольких нанометров, когда существенную роль играет пространственная неоднородность материала. Поэтому нами была построена теория, позволяющая получить эффективные упругие свойства с учетом сильного беспорядка силовых констант. Полученное распределение эффективного упругого контраста $\alpha(\mathbf{r})$ неупорядоченной среды подчиняется уравнению

$$\alpha(\mathbf{r}) = 1 + \xi^2 \Delta \ln \alpha(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где ξ является масштабом неоднородности среды, а Δ обозначает лапласиан. Для сильно неупорядоченной среды решением данного уравнения является $\alpha(\mathbf{r}) \gg 1$ на расстоянии порядка ξ от поверхности наночастицы и экспоненциальное поведение $\alpha(\mathbf{r}) - 1 \sim \frac{1}{r} \exp(-r/\xi)$ вдали от наночастицы, что согласуется с результатами молекулярной динамики. Таким образом, эффективный радиус наночастицы больше ее геометрического радиуса R на величину порядка масштаба неоднородности ξ . Поэтому эффективный объем включений нанометрового размера может в несколько раз превосходить их исходный размер, что существенно увеличивает влияние наночастиц на макроскопические упругие свойства аморфных и полимерных материалов.

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

Список литературы

- [1] Y. Mai, Z. Yu, Polymer Nanocomposites, Woodhead Publishing, 2006.
- [2] D. R. Paul, L. M. Robeson, Polymer **49**, 3187 (2008).
- [3] S.-Y. Fu et al., Compos. Part B: Eng. **39**, 933 (2008).
- [4] Y. Ou, F. Yang, Z.-Z. Yu, J. Pol. Sci. B **36**, 789 (1998).
- [5] B. Wetzels, F. Hupert, M. Q. Zhang, Composites Science and Technology **63**, 2055 (2003).
- [6] Y. M. Beltukov, D. A. Conyuh, I. A. Solov'yov. Phys. Rev. E **105**, L012501 (2022).

Динамические триплетные корреляции в гетероструктурах сверхпроводник/магнетик

И.В. Бобкова,^{1,2*} А.М. Бобков,¹ М.А. Силаев,³ W. Belzig,⁴ A. Kamra⁵

¹*МФТИ, Долгопрудный, Россия*

²*ВШЭ, Москва, Россия*

³*Tampere University, Tampere, Finland*

⁴*University of Konstanz, Konstanz, Germany*

⁵ *Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Spain*

*email: bobkova.iv@mipt.ru

В докладе обсуждаются два различных механизма возникновения динамических триплетных сверхпроводящих корреляций в мезоскопических системах сверхпроводник/магнетик. В рамках первого механизма динамические триплеты стимулируются переменным электрическим полем. Эффект основан на взаимодействии между ферромагнетизмом, спин-орбитальным взаимодействием и движением сверхпроводящего конденсата, которое вызывается полем и конвертирует скрытые статические р-волновые сверхпроводящие корреляции в динамические s-волновые. Показывается, что критический ток джозефсоновского контакта, в котором реализован эффект, пропорционален мощности приложенного электромагнитного излучения или переменного тока. Рассматриваются возможные применения эффекта в сверхпроводящей электронике и спинтронике [1].

Второй механизм работает в тонкопленочных структурах сверхпроводник/магнетик и описывает универсальную генерацию динамических триплетных корреляций в сверхпроводнике магнонами с ненулевым волновым вектором через эффект близости. Показано, что в таких структурах магнон индуцирует вокруг себя облако триплетных куперовских пар, которые перенормируют его массу и спин. Рассматриваются свойства и некоторые спинтронные применения таких композитных квазичастиц [2].

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 22-42-04408.

Список литературы

- [1] I.V. Bobkova, A.M. Bobkov, and M.A. Silaev, Phys. Rev. Lett. **127**, 147701 (2021).
- [2] I.V. Bobkova, A.M. Bobkov, A. Kamra, and W. Belzig, **3**, 95 (2022).

Фототок при комбинационном рассеянии света

М.М. Глазов,^{1,*} Л.Е. Голуб¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, Россия

*email: glazov@coherent.ioffe.ru

Предсказан новый эффект – генерация постоянного электрического тока в условиях комбинационного рассеяния света, распространяющегося в области прозрачности нецентросимметричной среды. Предложенный *рамановский фотогальванический эффект* (РФГЭ) обусловлен тем, что при рассеянии света на свободных электронах формируется анизотропное в $\mathbf{k}$ -пространстве распределение носителей заряда, а также возникают квантовые сдвиги электронных волновых пакетов. Таким образом создается постоянный ток, величина которого пропорциональна интенсивности света, а направление определяется поляризацией света и симметрией системы [1].

Микроскопическая теория эффекта построена для двух случаев: (i) объемного гиротропного полупроводника и (ii) структуры с квантовой ямой в условиях рассеяния света на межподзонном резонансе. Кроме того, проанализирована передача волнового вектора электронам при рассеянии света и показано, что связанный с ней вклад в фототок, зависящий от циркулярной поляризации света, обладает малостью.

Также в докладе будет обсуждаться отличие предсказанного РФГЭ от фотогальванического эффекта и эффекта увлечения электронов фотонами, широко известных в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах и наблюдаемых в области поглощения света [2]. Будут проанализированы недавние работы [3,4], где утверждалось в противоречии с [5], что фототоки могут возникать без диссипации. Нами показано, что постоянный ток может быть в общем случае представлен в виде

$$\mathbf{j} = e\mathbf{v}\tau_p\dot{N},$$

где e – заряд электрона, $\mathbf{v}$ – характерная скорость, приобретаемая электроном в акте рассеяния света, τ_p – время импульсной релаксации, а $\dot{N}$ – темп реальных переходов (связанных с рассеянием фотонов на электронах в спектральной области прозрачности или с поглощением фотонов в области поглощения). Для сдвигового вклада $\mathbf{v}\tau_p$ заменяется характерным сдвигом волнового пакета $\mathbf{R}$ при рассеянии. Для света, распространяющегося в области прозрачности кристалла $\dot{N} \sim \mathcal{K}I/\hbar\omega$, где I – интенсивность света, а $\mathcal{K}$ – коэффициент экстинкции, связанный с рассеянием света.

Работа поддержана грантом РНФ 22-12-00211.

Список литературы

- [1] L. E. Golub and M. M. Glazov, Raman photogalvanic effect: Photocurrent at inelastic light scattering, Phys. Rev. B **106**, 205205 (2022).
- [2] Б. И. Стурман, В. М. Фридкин, *Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления*. М.: Наука (1992).
- [3] Yugo Onishi, Hikaru Watanabe, Takahiro Morimoto, and Naoto Nagaosa, Effects of relaxation on the photovoltaic effect and possibility for photocurrent within the transparent region, Phys. Rev. B **106**, 235110 (2022).
- [4] L. Shi, O. Matsyshyn, J. C. W. Song, and I. S. Villadiego, The Berry dipole photovoltaic demon and the thermodynamics of photo-current generation within the optical gap of metals, arXiv:2207.03496 (2022).
- [5] Б.И. Белиничер, Е.Л. Ивченко, Г.Е. Пикус, Нестационарный фототок в гиротропных кристаллах, ФТП **20**, 886 (1986).

Эффект Парселла в пластинах двумерных фотонных кристаллов с треугольной решеткой

С.А. Дьяков,^{1,*} Д.В. Юрасов,² С.Г. Тиходеев,^{3,4} Н.А. Гиппиус,¹

¹*Сколковский институт науки и технологий, Большой бульвар, 30, стр. 1,
Москва, Россия*

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

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские
горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия*

⁴*Институт общей физики им А.М. Прохорова РАН, ул. 38, Москва, 117942,
Россия*

*email: s.dyakov@skoltech.ru

Представлены результаты теоретических исследований эффекта Парселла в бесконечной пластине фотонного кристалла без дефектов и полостей. Описана теоретическая модель для расчета общего и внешнего факторов Парселла в таких структурах с точки зрения излучательной способности диполя в ближней и дальней зоне. Описанная регулярная процедура применена к пластинам кремниевых фотонных кристаллов с треугольной решеткой и изучено, как фактор Парселла зависит от длины волны и положения диполя. Показано, что, помещая диполи в пучности мод с нулевой групповой скоростью, можно значительно увеличить фактор Парселла по сравнению с однородной кремниевой пластиной. Также показано, что этот эффект связан с особенностями Ван Хофа. Наконец, вычислены парциальные вклады в общий фактор Парселла различных каналов диссипации диполя.

Фотогальванические эффекты в сверхпроводящих конденсатах: нестационарная теория Гинзбурга - Ландау

А.С.Мельников^{1,2*}

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

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

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

В работе предлагается теоретическое описание фотогальванических эффектов в сверхпроводящих конденсатах в рамках нестационарной модели Гинзбурга - Ландау (ГЛ). Рассматриваются различные варианты теории ГЛ, соответствующие как полностью бесщелевым сверхпроводникам, так и учитывающие конечную величину сверхпроводящей щели и сильную электрон - фононную релаксацию. Показано, что генерация постоянного тока и возникновение магнитного момента в поле электромагнитной волны различной поляризации (линейной или циркулярной) существенно определяется мнимой частью константы релаксации в уравнении ГЛ. Для температур ниже критической температуры сверхпроводящего перехода рассмотрены следующие задачи: (а) генерация фотоиндуцированного постоянного тока в тонкой пленке и полупространстве в поле линейно поляризованной электромагнитной волны; (б) генерация второй гармоники в указанной геометрии; (в) генерация магнитного момента сверхпроводящего конденсата под действием циркулярно поляризованной электромагнитной волны (обратный эффект Фарадея); (г) задача о возникновении состояния с отличной от нуля полной завихренностью, знак которой определяется направлением вращения поляризации электромагнитной волны. Обсуждается связь с эффектом Холла в сверхпроводнике, особенностями гидродинамики сверхпроводящего конденсата, с механизмом Киббла - Зурека, отвечающего за генерацию флуктуационных пар вихрь - антивихрь, с результатами других групп по фотогальваническим эффектам во флуктуационном режиме выше критической температуры, а также в полностью нормальном (несверхпроводящем) состоянии.

Исследование механизмов межзонной релаксации неравновесных
носителей заряда в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe для
лазеров и приемников среднего ИК диапазона

С.В. Морозов

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

В работе исследовались гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) HgCdTe/CdHgTe для разработки на их основе межзонных источников и приемников излучения среднего и дальнего ИК диапазонов. Межзонные полупроводниковые лазеры на основе структур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe имеют ряд свойств, делающих их привлекательными для длинноволновых лазеров. Например, за счёт сильно непараболических законов дисперсии электронов и дырок, квазисимметричных в окрестности $k = 0$, в таких структурах удаётся существенно подавить безызлучательную оже-рекомбинацию и увеличить её порог относительно объемных материалов твердых растворов HgCdTe от нескольких единиц до 30 -- 40 мэВ. При существенном подавлении безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла, важном механизме при рассмотрении перспектив таких структур в качестве межзонных приемников среднего и дальнего ИК диапазонов, при высокой концентрации неравновесных носителей заряда вопрос межзонной рекомбинации фактически сводится к традиционной конкуренции излучательной и безызлучательной оже-рекомбинации. В данной работе экспериментально и теоретически исследуются как фундаментальные процессы межзонной рекомбинации носителей заряда в подобных КЯ, определяющие достижимость усиления излучения в материале КЯ, так и смежные вопросы о влиянии конструкции диэлектрического волновода на возможность получения однопроходового стимулированного излучения. Кроме того, по мере перехода к структурам с E_g меньше 100 мэВ становятся актуальны вопросы избыточного разогрева носителей заряда при накачке структур излучением с энергией фотонов, существенно превышающей E_g .

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ проект № 22-12-00310.

Оптомеханические эффекты в волноводах с квантовыми излучателями

А.В. Пошакинский,* Е.С. Вяткин, А.Н. Поддубный

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

**email: poshakinskiy@gmail.com*

Квантовая электродинамика в оптических волноводах с помещенными вблизи них квантовыми излучателями, такими как квантовые точки, одиночные атомы или сверхпроводящие кубиты, активно развивается в настоящее время [1] и уже нашла применения в квантовых вычислениях и криптографии. В докладе будет представлена теория квантовоэлектродинамических эффектов в одномерном волноводе с массивом двухуровневых атомов, параметры которых динамически модулируются за счет собственных механических колебаний или посредством внешнего воздействия.

В случае, когда частота модуляции Ω меньше частоты атомного резонанса ω_0 , при прохождении света через систему происходят процессы комбинационного рассеяния [2]. В результате фотон, обладавший частотой ω , переходит в суперпозицию состояний с частотами $\omega + n\Omega$, где n – целое число. Такой фотон можно рассматривать как многоуровневый кудит, а его прохождение через систему соответствует определенной унитарной операции. Если на систему падают несколько фотонов одновременно, вылетающие фотоны оказываются запутанными [3]. Так пара атомов, параметры которых модулируются в противофазе, позволяют создать двухфотонное белловское состояние.

Когда частота модуляции Ω превосходит $2\omega_0$, становятся возможными процессы параметрической генерации фотонных пар. Наиболее сильное излучение реализуется, если частота модуляции попадает в резонанс с энергией одного из собственных двукратно возбужденных состояний массива [4]. В случае, когда модуляция обусловлена механически движением, возникновение излучения может быть интерпретировано как результат динамического эффекта Казимира. Оптомеханическая сила реакции излучения, действующая на атомы, приводит к перенормировке их собственных колебательных частот и появлению конечного затухания у механических колебаний.

Список литературы

- [1] A.S. Sheremet, M.I. Petrov, I.V. Iorsh, A.V. Poshakinskiy, A.N. Poddubny, Rev. Mod. Phys. **95**, 015002 (2023).
- [2] I. Iorsh, A.V. Poshakinskiy, A.N. Poddubny, Phys. Rev. Lett. **125**, 183601 (2020).
- [3] D. Ilin, A. Poshakinskiy, A. Poddubny, I. Iorsh, Phys. Rev. Lett. **130**, 023601 (2023).
- [4] E.S. Vyatkin, A.V. Poshakinskiy, A.N. Poddubny, arXiv:2302.12792 (2023).

Изменение текстуры неелевского скирмиона в полях рассеяния пирловского вихря

S.S. Apostoloff^{1,2,*}, Е.С. Андрияхина^{3,1}, И.С. Бурмистров^{1,2}

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

²*Международная лаборатория физики конденсированного состояния,
НИУ Высшая школа экономики, Москва, Россия*

³*Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия.*

*email: ssapostoloff@yandex.com

Гетероструктуры на основе тонких плёнок сверхпроводника и ферромагнетика в последние годы стали привлекать внимание исследователей благодаря тому, что в таких системах можно наблюдать взаимодействие сверхпроводящих вихрей и вихрей намагниченности — магнитных скирмионов. Такие топологически нетривиальные конфигурации могут быть носителями майорановских возбуждений и представлять основу для реализации масштабируемых квантовых вычислений [1]. Недавно возможность устойчивого сосуществования магнитных скирмионов и сверхпроводящих вихрей была подтверждена экспериментально [2]. Связанные пары скирмион–вихрь формируются как вследствие взаимного влияния спин-орбитального взаимодействия и эффекта близости, так и благодаря наличию полей рассеяния. Традиционно при теоретическом изучении таких связанных пар влияние рассеянных полей не учитывается. Однако, как было показано в работе [3], учёт полей рассеяния приводит к неожиданному результату: центры скирмиона и вихря, которые образуют устойчивую конфигурацию, могут располагаться на некотором конечном расстоянии. Анализ в работе [3] был ограничен низшим порядком теории возмущений и не учитывал изменение текстуры скирмиона.

В данной работе мы изучили изменение текстуры неелевского скирмиона, возникающее в результате действия полей рассеяния сверхпроводящего пирловского вихря. Во-первых, было проведено микромагнитное моделирование ферромагнетика при наличии взаимодействия Дзялошинского-Мории, которое подтвердило возможность существования устойчивого скирмиона на некотором расстоянии от центра вихря [4]. Во-вторых, основываясь на текстурах, полученных в микромагнитном моделировании для различных характеристик гетероструктуры, был построен новый анзац, который описывает текстуру скирмиона с помощью аналитической формулы, определяемой всего тремя свободными параметрами — радиуса, ширины доменной стенки и расстояния между центрами скирмиона и вихря. Применение анзаца дает возможность аналитического решения ряда задач в системах магнитных скирмионов и сверхпроводящих вихрей. В частности, используя этот анзац, были изучены различные устойчивые конфигурации, которые соответствуют связанным парам скирмион–вихрь.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 21-42-04410.

Список литературы

- [1] J. Nothhelfer *et al*, Phys. Rev. B **105**, 224509 (2022).
- [2] A.P. Petrović *et al*, Phys. Rev. Lett. **126**, 117205 (2021).
- [3] E.S. Andriyakhina, I.S. Burmistrov, Phys. Rev. B **103**, 174519 (2021).
- [4] E.S. Andriyakhina, S. Apostoloff, I.S. Burmistrov, JETP Letters **116**, 825 (2022).

Устные доклады

Reaction-diffusive dynamics of number-conserving dissipative quantum state preparation

P. A. Nosov,¹ D. S. Shapiro,² M. Goldstein,³ I. S. Burmistrov^{4,*}

¹*Stanford Institute for Theoretical Physics, Stanford University, Stanford, California 94305, USA*

²*National University of Science and Technology MISiS, 119049 Moscow, Russia*

³*Raymond and Beverly Sackler School of Physics and Astronomy, Tel Aviv University, Tel Aviv 6997801, Israel*

⁴*L. D. Landau Institute for Theoretical Physics, acad. Semenova av. 1-a, 142432 Chernogolovka, Russia*

*email: burmi@itp.ac.ru

The use of dissipation for the controlled creation of nontrivial quantum many-body correlated states is of much fundamental and practical interest. What is the result of imposing number conservation, which, in closed system, gives rise to diffusive spreading? We investigate this question for a paradigmatic model of a two-band system [1], with dissipative dynamics aiming to empty one band and to populate the other, which had been introduced before for the dissipative stabilization of topological states. Going beyond the mean-field treatment of the dissipative dynamics, we demonstrate the emergence of a diffusive regime for the particle and hole density modes at intermediate length- and time-scales, which, interestingly, can only be excited in nonlinear response to external fields. We also identify processes that limit the diffusive behavior of this mode at the longest length- and time-scales. Strikingly, we find that these processes lead to a reaction-diffusion dynamics governed by the Fisher-Kolmogorov-Petrovsky-Piskunov equation, making the designed dark state unstable towards a state with a finite particle and hole density. These results open up many future research directions. It would be interesting to characterize the new steady state with nonzero particle and hole densities. It would also be worthwhile to study implications of the existence of a diffusive regime for nontrivial topological properties of the considered model.

The details can be found in preprint [2]. The work of P.A.N. was supported in part by the US Department of Energy, Office of Basic Energy Sciences, Division of Materials Sciences and Engineering, under contract number DE-AC02-76SF00515. The work of D.S.S. was funded by DFG Grant No. MI 658/13-1. M.G. was supported by the Israel Science Foundation (ISF) and the Directorate for Defense Research and Development (DDR&D) Grant No. 3427/21, and by the US-Israel Binational Science Foundation (BSF) Grant No. 2020072. The work of I.S.B. was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 22-22-00641.

References

- [1] F. Tonielli, J. C. Budich, A. Altland, S. Diehl, Phys. Rev. Lett. 124, 240404 (2020).
- [2] P. A. Nosov, D. S. Shapiro, M. Goldstein, I. S. Burmistrov, arxiv:2301.05258.

Переход в гидродинамический режим при оптическом возбуждении графеновых сверхрешеток

В. Ю. Качоровский^{1,*}, С. О. Поташин¹, Л. Е. Голуб¹, В. В. Бельков¹,
С. Д. Ганичев².

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

² Terahertz Center, University of Regensburg, Regensburg, Germany

*email: kachor.valentin@gmail.com

Экспериментально обнаружен и теоретически описан dc фотоотклик асимметричной сверхрешетки (double grating gate structure) на основе двухслойного графена на терагерцовое излучение [1]. Подробно исследована зависимость фототока j_{dc} от частоты излучения ω . Разработана теория, наглядно демонстрирующая переход от режима дрейф-диффузия (DD) к гидродинамическому (HD) режиму с увеличением темпа электрон-электронных столкновений. Ключевым предсказанием является качественно различная частотная зависимость тока в этих режимах: медленная зависимость, $j_{dc} \propto 1/\omega^2$, в DD режиме (при больших ω), и гораздо более сильная зависимость, $j_{dc} \propto 1/\omega^6$, в HD режиме. Теоретические предсказания очень хорошо согласуются с экспериментом (см. Рис. 1а и Рис. 1б). Также изучен dc фотоотклик в магнитном поле в режиме шубниковских осцилляций. Показано, что поле приводит к гигантскому (на два порядка) увеличению j_{dc} . Изучен циклотронный резонанс (CR) и его вторая гармоника, а также исследована роль плазменных эффектов, которые приводят к возникновению магнетоплазменного резонанса (MP) (см. Рис. 1с). Наблюдаемое в эксперименте сильное подавление второй гармоники CR также указывает на реализацию гидродинамического режима.

Работа выполнена при поддержке РНФ 20-12-00147 и РФФИ 21-52-12015

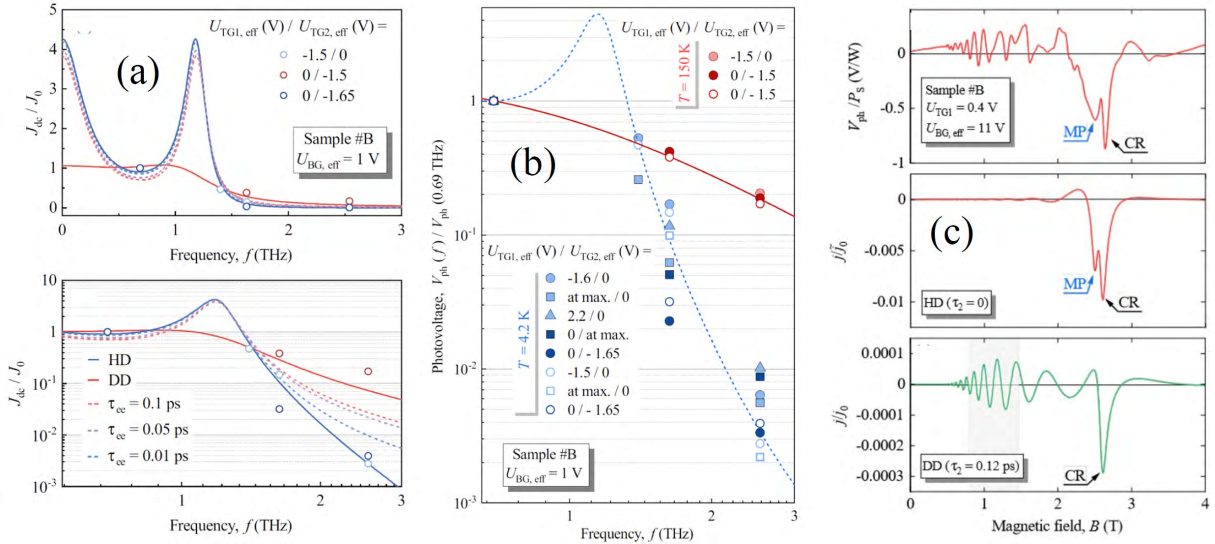


Рис. 1: (а) Зависимость $j_{dc}(\omega)$ в HD (синий цвет) и DD (красный цвет) режимах (top-обычный масштаб, bottom-логарифмический масштаб); (б) Зависимость $j_{dc}(\omega)$ при $T = 150$ К - красный цвет и при $T = 4.2$ - синий цвет; (с) Экспериментальная зависимость тока от магнитного поля при $f=2.54$ ТГц (top), HD теория (center), DD теория (bottom) .

Список литературы

[1] E. Mönch, S.O. Potashin, K. Lindner, I. Yahniuk, L.E. Golub, V.Yu. Kachorovskii, V. V. Bel'kov, R. Huber, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Eroms, D. Weiss, and S. D. Ganichev, Phys. Rev. B **105**, 045404 (2022); Phys. Rev. B **107**, 115408 (2023).

Фотоиндуцированный эффект Холла для сверхтока в 2D сверхпроводниках

А.В. Парафило,¹ В.М. Ковалёв,^{2*} И.Г. Савенко^{3,4}

¹Center for Theoretical Physics of Complex Systems, IBS, Daejeon 34126, Korea

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB of RAS, Novosibirsk 630090, Russia

³Guangdong Technion Israel Institute of Technology (GTIIT), Shantou, 515603, China

⁴Technion – Israel Institute of Technology, 32000 Haifa, Israel

*email: vadimkovalev@isp.nsc.ru

Поглощение электромагнитного (ЭМ) излучения является одним из ключевых экспериментальных методов исследования свойств сверхпроводников. Первые работы по теории поглощения ЭМ излучения в сверхпроводниках [1] появились сразу после модели БКШ. Было показано, что поглощение однородного ЭМ поля с частотой $\omega > \Delta$ в чистых сверхпроводниках запрещено, и конечное поглощение может иметь место лишь при учете рассеяния электронов на примесях. В недавних работах [2] изучался вопрос поглощения ЭМ излучения в изотропных сверхпроводниках со встроенным сверхпроводящим током. В случае чистых сверхпроводников со встроенным током, поглощение ЭМ при $\omega > \Delta$ также запрещено вследствие галилеевской инвариантности. Последняя может нарушаться кристаллической решеткой материала [2] приводя к значительной величине оптического поглощения. В области $\omega \ll \Delta$ в присутствии сверхтока ЭМ поглощение в сверхпроводниках *s*- и *d*-типа изучалось в [3]. Было показано, что оптическая проводимость в этом случае пропорциональна квадрату величины сверхтока и времени неупругой релаксации квазичастиц, $\sigma(\omega) \propto \tau_{in} j_s^2$. Величина τ_{in} в сверхпроводниках может быть значительной, приводя к большим значениям величины поглощения $\propto \text{Re } \sigma(\omega)$.

В настоящей работе построена теория нелинейного отклика изотропных 2D сверхпроводников при наличии встроенного постоянного сверхтока при $\omega > \Delta$ и при низких температурах, $T \ll T_c$. Феноменологически, фотоиндуцированный ток квазичастиц определяется соотношением, *линейным* по $\mathbf{j}_s$:

$$\mathbf{j} = a_\omega |\mathcal{A}|^2 \mathbf{j}_s + b_\omega \left(\mathcal{A}(\mathcal{A}^* \cdot \mathbf{j}_s) + (\mathcal{A} \cdot \mathbf{j}_s) \mathcal{A}^* \right) + i c_\omega [\mathbf{j}_s \times [\mathcal{A} \times \mathcal{A}^*]]. \quad (1)$$

Здесь $\mathcal{A}$ – векторный потенциал внешнего ЭМ поля. Предполагается, что галилеевская инвариантность нарушена наличием примесей. Обсуждается частотное поведение коэффициентов в выражении (1) вблизи резонанса $\omega \approx \Delta$. Показано, что ток (1) пропорционален большой величине – времени рекомбинации фотовозбужденных квазичастиц, τ_R . При циркулярной поляризации ЭМ излучения, ток $\mathbf{j}$ в (1) ортогонален встроенному току $\mathbf{j} \perp \mathbf{j}_s$. Требование отсутствия в сверхпроводнике (в стационарном режиме) электрического поля приводит к требованию генерации дополнительного сверхтока $\mathbf{j}'_s$, такого, что $\mathbf{j} + \mathbf{j}'_s = 0$. Как следствие, $\mathbf{j}'_s \perp \mathbf{j}_s$, т.е. поглощение циркулярного ЭМ излучения приводит к холловскому отклику сверхтока.

Список литературы

- [1] А.А. Абрикосов, Л.П. Горьков, ЖЭТФ **35**, 1558 (1958), D.C. Mattis and J. Bardeen, Phys. Rev. **111**, 412 (1958).
- [2] P.J.D. Crowley, L. Fu, Phys. Rev. B **106**, 214526 (2022), M. Papaj, J.E. Moore, Phys. Rev. B **106**, L220504 (2022)
- [3] M. Smith, A.V. Andreev, B.Z. Spivak, Annals of Physics **417** 168105 (2020)

Увеличение созданной током спиновой поляризации в квантовой точке за счет эффекта Кондо

В.Н. Манцевич,^{1,2,*} Д.С. Смирнов²

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

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

*email: vmantsev@gmail.com

Полупроводниковые квантовые точки являются перспективными объектами для масштабируемой квантовой обработки информации с использованием локализованных спинов в качестве кубитов. Одним из способов создать спиновую поляризацию является неравновесное протекание тока, приводящее к нарушению симметрии временной инверсии [1]. Однако, как правило, степень индуцированной током спиновой поляризации невелика. Это связано со слабостью спин-орбитального взаимодействия и малой величиной соотношения скорости дрейфа и скорости Ферми. Нами продемонстрировано, что спиновая поляризация может резко возрасти при низких температурах из-за эффекта Кондо [2].

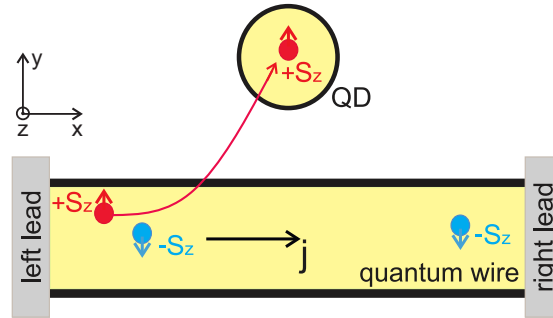


Рис. 1: Схематическое изображение квантовой точки, связанной с квантовым проводом спин-зависимым туннелированием.

В качестве модельного объекта рассмотрена квантовая точка, расположенная рядом с квантовым проводом, как показано на рис. 1. Между квантовой точкой и квантовым проводом возможно спин-зависимое туннелирование электронов. Ранее нами была продемонстрирована возможность создавать в такой системе спиновую поляризацию в квантовой точке за счет протекания электрического тока по квантовому проводу [3]. В данной работе методом неравновесных функций Грина, показано, что многочастичные корреляции между квантовой точкой и квантовым проводом могут увеличить спиновую поляризацию в квантовой точке при низких температурах почти на два порядка [2]. Увеличение спиновой поляризации связано с образованием пика Кондо в плотности состояний и спиновой нестабильностью из-за сильного кулоновского взаимодействия. Предложенный эффект может быть реализован в современных наноструктурах с двумерным электронным или дырочным газом [4] и использоваться для эффективного манипулирования локализованными электронными спинами в квантовых точках.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-12-00139.

Список литературы

- [1] Е. Л. Ивченко и Г. Е. Пикус, Письма в ЖЭТФ **27**, 640 (1978).
- [2] V.N. Mantsevich and D.S. Smirnov, arXiv:2303.11778 (2023).
- [3] V.N. Mantsevich and D.S. Smirnov, Nanoscale Horiz. **7**, 752 (2022).
- [4] L. W. Smith, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **128**, 027701 (2022).

Спиновые переходы в мультстабильном конденсате двумерных экситонных поляритонов

С. С. Гаврилов,^{1,*}

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

*email: gavr_ss@issp.ac.ru

Двумерные поляритоны, локализованные в активной области плоского микрорезонатора и возбуждаемые резонансным светом, образуют макроскопически когерентные состояния, которые могут рассматриваться в приближении среднего поля по аналогии с неравновесными бозе-конденсатами. Благодаря нелинейности такая система оказывается мультстабильной и в ней возможны чрезвычайно быстрые управляемые переключения между альтернативными когерентными состояниями, различающимися по амплитуде, фазе или знаку циркулярной поляризации [1]. В докладе обсуждаются недавние экспериментальные [2] и теоретические [3] результаты, полученные в этой области.

В частности, было продемонстрировано, что короткое обратимое возмущение собственной энергии экситона, вызванное деформационным импульсом пикосекундной длительности, может сопровождаться резким необратимым переходом от почти линейной к почти циркулярной поляризации света, излучаемого поляритонами под действием непрерывной лазерной волны [2]. Этот эффект был предсказан ранее [1]; его наблюдение подтверждает основные микроскопические предпосылки теории, в частности, сильное упругое отталкивание поляритонов с параллельными спинами (соответствующий синий сдвиг резонанса на порядок превосходит ширину линии) и пренебрежимо малое парное взаимодействие поляритонов с антипараллельными спинами (это дает возможность манипулировать спиновыми компонентами по отдельности).

Определенный интерес также вызывает система, в которой спиновые компоненты конденсата, возбуждаемые строго одинаково, связаны между собой линейным образом. Такая связь может быть вызвана искусственно и поддается контролю — например, в условиях латеральной анизотропии квантовой ямы или в магнитном поле, направленном параллельно резонатору. Согласно [3], в подобной системе существует непрерывный переход от мультстабильных к автоколебательным состояниям, фазовые траектории которых находятся в близкой окрестности потерявших устойчивость неподвижных точек с преимущественно правой или левой циркулярной поляризацией. Изменение плотности возбуждения приводит к росту амплитуды колебаний, после чего два одинаково допустимых решения объединяются и возникает новое — полностью симметричное по спину, но нестационарное — состояние системы. Его частотный спектр представляет собой множество эквидистантных уровней с чередующимися ортогональными линейными поляризациями. Подобное состояние представляет собой “вынужденный” аналог джозефсоновских осцилляций, реализующийся в случае диссипативной бозе-системы в резонансном электромагнитном поле.

Список литературы

- [1] С. С. Гаврилов, УФН **190**, 137 (2020).
- [2] A. A. Demenev, D. D. Yaremkevich, A. V. Scherbakov, S. S. Gavrilov, D. R. Yakovlev, V. D. Kulakovskii, and M. Bayer, Phys. Rev. Applied **18**, 044045 (2022).
- [3] S. S. Gavrilov, Phys. Rev. B **106**, 045304 (2022).

Вязкое течение двухкомпонентной электронной жидкости

П.С. Алексеев

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

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

Построена теория магнетотранспорта в вязкой двумерной жидкости, состоящей из электронов двух типов. В такой системе медленное рассеяние с переходом электронов из одной компоненты в другую приводит к нетривиальному влиянию потоков компонент жидкости и их пространственной неоднородности на течение в целом. Для случая электронов в двух зеемановских подзонах изученные эффекты относятся к группе спинового эффекта Холла; для однокомпонентной вязкой электронной жидкости родственные эффекты изучались, например, в работах [1,2]. Следуя публикациям [3] по гидродинамическому транспорту в электрон-дырочных системах, построены гидродинамические балансовые уравнения, учитывающие сдвиговую вязкость, диффузию компонент жидкости и переходы электронов из одной компоненты в другую [4]. Полученные уравнения были решены для длинного образца с шероховатыми краями в магнитном поле $\mathbf{B}$, перпендикулярном слою (см. Рис. 1).

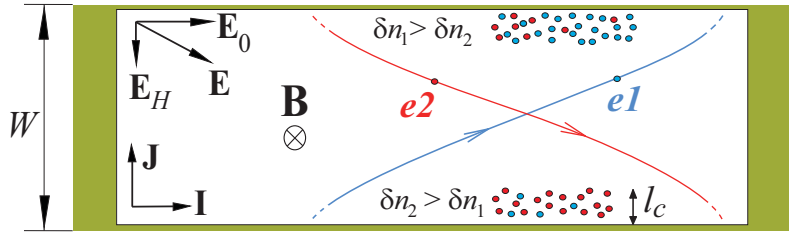


Рис. 1: Длинный образец с двухкомпонентной электронной жидкостью в магнитном и электрическом полях. Показаны линии тока компонент жидкости $e1$ и $e2$, а также направления электрического тока $\mathbf{I}$ и потока $\mathbf{J}$ разности плотностей электронов $e1$ и $e2$.

Показано, что в широких образцах, $W \gg l_c$, переходы электронов из одной компоненты жидкости в другую приводят к формированию единой вязкой жидкости между прикраевыми слоями с возмущенными плотностями компонент. Ширина слоев l_c определяется скоростью переходов. В узких образцах, $W \ll l_c$, две компоненты жидкости текут независимо, однако с ростом магнитного поля роль столкновений с изменением типа возрастает, величина $l_c = l_c(B)$ становится меньше W , и снова формируется режим единой жидкости. Магнетосопротивление в области относительно малых магнитных полей, где вязкость меняется слабо, оказывается положительным и насыщающимся, что отражает описанную смену типа течения. Изученный эффект может служить объяснением подавления гигантского отрицательного магнетосопротивления, наблюдавшегося в чистых квантовых ямах GaAs, приложением к наклонного магнитного поля (приводящего к зеемановскому расщеплению).

Список литературы

- [1] M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, Phys. Rev. B **96**, 020401 (2017).
- [2] M. M. Glazov, 2D Materials **21**, 015027 (2021).
- [3] P. S. Alekseev, A. P. Dmitriev, I. V. Gornyi, V. Yu. Kachorovskii, B. N. Narozhnyi, M. Titov, Phys. Rev. B **97**, 085109 (2018); **98**, 125111 (2018).
- [4] П. С. Алексеев, ФТП **56**, 866 (2022).

Динамическая поляризация электронного спина в непрямозонных КТ

Т.С. Шамирзаев,^{1,*} Д.С. Смирнов,² Д.Р. Яковлев,^{2,3} М. Bayer³

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

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

³Experimentelle Physik 2, Technische Universitat Dortmund, 44227 Dortmund, Germany

*email:sha_tim@mail.ru

Новый механизм спиновой ориентации локализованных электронов, динамическая спиновая поляризация электронов имеет место при взаимодействии с флуктуациями ядерного спина [1]. Показано, что флуктуации ядерного спина могут быть использованы для поляризации углового момента электронов через сверхтонкое взаимодействие в слабом магнитном поле. Для этого образец освещается неполяризованным светом, который напрямую не поляризует ни ядра, ни электроны. Динамика степени циркулярной поляризации ФЛ в продольном магнитном поле для непрямозонных КТ (In,Al)As/AlAs показана на рис.1а. Видно, что поляризация появляется с задержкой в 15 мкс после окончания импульса возбуждения (т.е. после рекомбинации светлых экситонов) и насыщается на уровне 30% через 100 мкс. Зависимость степени поляризации от магнитного поля, проинтегрированная для двух временных окон, показана на рис.1б. Степень поляризации увеличивается в слабых полях, достигает максимума в 30% при B_z порядка 17 мТл, а затем монотонно уменьшается, стремясь к нулю в сильных полях. Теоретически показано, что для электронов, связанных в локализованных экситонах, возможна 100% спиновая поляризация в продольных магнитных полях в несколько миллитесла. Неожиданно, эффект исчезает в КТ малого размера.

Работа поддержана РНФ, проект №22-12-00022.

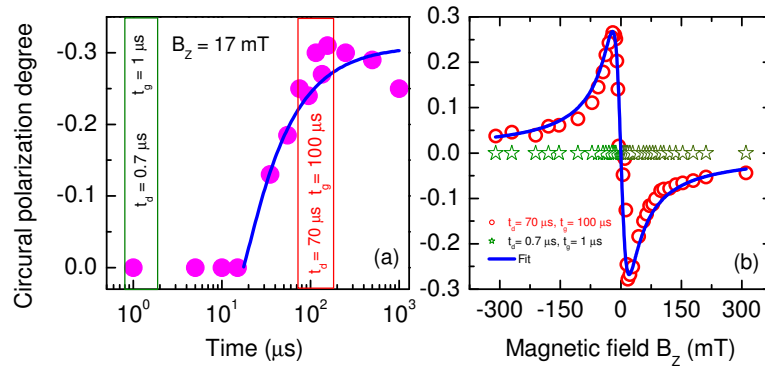


Рис. 1: Динамика степени круговой поляризации ФЛ, измеренная при $T=2$ К, время интегрирования 5 мкс. Вертикальные линии показывают окна интегрирования по времени для панели (b) Зависимости степени поляризации ФЛ от магнитного поля, измеренные при: 0.7 мкс и 70 мкс с окнами интегрирования 1 мкс и 100 мкс, соответственно.

Список литературы

[1] D. S. Smirnov, T. S. Shamirzaev, D. R. Yakovlev, M. Bayer, Phys. Rev. Lett. **125**, 156801 (2020).

Нелинейные квазимонохроматические плазменные волны в двумерной электронной системе

А.А. Заболотных,^{1,*}

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

**email: zabolotnykh@phystech.edu*

В работе аналитически исследуется нелинейная динамика квазимонохроматических плазменных волн в двумерной (2D) электронной системе (ЭС), помещенной между двух идеальных металлических электродов (затворов). Под квазимонохроматической волной подразумевается модулированная волна, у которой амплитуда высокой по частоте несущей медленно меняется в пространстве и времени. Обычным способом описания динамики таких волн в любой системе является вывод уравнения для медленного изменения огибающей. В нелинейном случае, как правило, это уравнение имеет вид т.н. нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ) с кубическим нелинейным слагаемым, имеющего много интересных и неожиданных решений, достаточно подробно изученных в литературе и подтвержденных экспериментально, см., например, недавний обзор [1].

В данной работе найдено уравнение для огибающей плазменных волн в 2D ЭС в нелинейном режиме [2]. Получено, что оно действительно имеет вид НУШ с кубической нелинейностью. Оказывается, что, аналогично волнам на поверхности воды [3], нелинейные волны в 2D ЭС имеют разный характерный вид в зависимости от величины параметра qd , где q — волновой вектор несущей, d — расстояние между 2D ЭС и затворами (для волн на поверхности воды соответствующим параметром является qh , где h — глубина водоема). В коротковолновом случае, когда $qd < 1.61$, волна с постоянной амплитудой устойчива, и на её фоне может возникать т.н. темный солитон НУШ. При $qd > 1.61$ возникает неустойчивость волны с постоянной амплитудой и появляются решения в виде светлых солитонов. Помимо вышеперечисленных, НУШ имеет множество других решений. В рамках данной работы, будет кратко рассмотрен только ещё один тип решений НУШ для случая неэкранированный 2D ЭС, а именно т.н. солитон Перегринна — необычная волна, огибающая которой локализована не только в пространстве (как у солитонов), но и во времени [4].

Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ 21-72-00114.

Список литературы

- [1] F. Copie, S. Randoux, P. Suret, Rev. Phys. **5**, 100037 (2020).
- [2] A. A. Zabolotnykh, arXiv:2302.01057 (2023).
- [3] H. Hasimoto, H. Ono, J. Phys. Soc. Jpn. **33**, 805 (1972).
- [4] D. H. Peregrine, J. Austral. Math. Soc. Ser. B **25**, 16 (1983).

Теория создания многочастично запутанных состояний фотонов и ядер в квантовых точках

Д. С. Смирнов

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

*email: smirnov@mail.ioffe.ru

Создание многочастично запутанных состояний является сейчас наиболее жаркой тематикой теоретических и экспериментальных исследований по всему миру.

Поляризационно запутанные фотонные кластерные состояния могут генерироваться при возбуждении заряженной квантовой точки линейно поляризованными импульсами во внешнем магнитном поле [1]. В данной работе выполнен расчёт кластерных состояний с учётом сложной структуры валентной зоны, которая определяет тензор g -факторов тяжёлой дырки и фазы оптических матричных элементов. Вычислена спутанность (concurrence) поляризации фотона, испущенного квантовой точкой, и спина носителя заряда [2], а также чистота (fidelity) генерируемых кластерных состояний в зависти от направления поляризации оптических импульсов ϕ относительно кристаллических осей, см. рис. 1(а). Теоретические предсказания частично подтверждаются экспериментами, выполненными в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

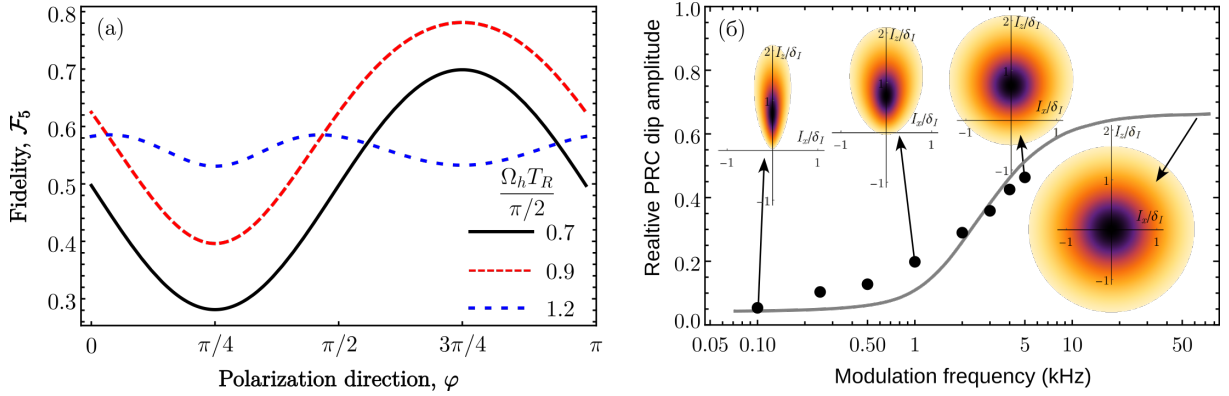


Рис. 1: (а) Чистота запутанного кластерного состояния из 5 фотонов для трёх различных величин поперечного магнитного поля. (б) Относительная глубина кривой восстановления спиновой поляризации, рассчитанная теоретически (сплошная кривая) и измеренная экспериментально для кристалла FAPbBr_3 (точки).

Также показана возможность генерации многочастично запутанных состояний спинов ядер в области локализации дырок в кристаллах перовскитов при их возбуждении импульсами света с различной частотой модуляции степени циркулярной поляризации и измерении эффекта восстановления спиновой поляризации в продольном магнитном поле [3]. Анализ экспериментов, выполненных в университете г. Дортмунд (Германия) показал, что при этом генерируются ядерные спиновые состояния со сжатой функцией распределения, см. вставки на рис. 1(б), которая соответствует примерно 750-частичной запутанности ядерных спинов [4].

Работа поддержана грантом РФФ № 21-72-10035.

Список литературы

- [1] N. H. Lindner and T. Rudolph, Phys. Rev. Lett. **103**, 113602 (2009).
- [2] N. V. Leppen, L. Lanco, and D. S. Smirnov, Phys. Rev. B **103**, 045413 (2021).
- [3] D. S. Smirnov *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 235413 (2020).
- [4] E. Kirstein, D. S. Smirnov, *et al.*, arXiv:2301.11460 (2023).

Экситоны и трионы с отрицательной приведенной массой в двумерных полупроводниках

М.А. Семина,^{1,*} Д.В. Мамедов,² М.М. Глазов¹

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

²НИУ Высшая школа экономики, г. Санкт-Петербург, Россия

*email: semina@mail.ioffe.ru

Построена теория возбужденных экситонов и трионов в атомарно-тонких дихалькогенидах переходных металлов (MX_2), в которых один из носителей заряда находится в “далекой” зоне и имеет отрицательную эффективную массу. Такая ситуация может реализовываться в монослое WSe_2 [1]. Нами проведен анализ существования связанных состояний экситонов и трионов в модели параболических зон, и получены условия на соотношения между эффективными массами носителей заряда, при которых эти кулоновские комплексы могут быть связаны. Область существования стабильных трионов оказывается узкой, причем она не соответствует известным значениям эффективных масс в далеких зонах [1].

Поэтому в дополнение к квадратичным членам в дисперсии мы учли также члены четвертой степени по волновому вектору, которые оказываются необходимыми для стабилизации экситона с отрицательной приведенной массой [1,2]. Взаимодействие между носителями заряда описывается потенциалом Рытовой-Келдыша. На основе точных аналитических расчетов с короткодействующим потенциалом для экситона и триона предложены вариационные функции с небольшим числом подгоночных параметров, вид которых отличается при положительной и отрицательной приведенной массе высоколежащего экситона, и которые применимы при любом виде межчастичного взаимодействия. Точность вариационного расчета с предложенными функциями проконтролирована сравнением с результатами прямого численного расчета в широком диапазоне значений параметров системы [2].

Проанализированы зависимости энергий связи экситона и триона как от приведенной массы высоколежащего экситона (как положительной так и отрицательной), так и от параметра, описывающего непараболичность дисперсии возбужденной зоны проводимости. Получена аналитическая асимптотика энергий связи экситона и триона в пределе сильной непараболичности. Проанализированы отклонения экситонной серии от водородоподобной. Описаны результаты недавних экспериментов [1] по наблюдению положительно и отрицательно заряженных трионов с отрицательной эффективной массой электрона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 23-12-00142).

Список литературы

[1] Kai-Qiang Lin, M.A. Semina et al., Nat. Commun. 13, 6980 (2022).

[2] M.A. Semina, J.V. Mamedov, M.M. Glazov, Oxford Open Materials Science, itad004, [doi:10.1093/oxfmat/itad004](https://doi.org/10.1093/oxfmat/itad004) (2023).

Перемешивание и неперемешивание двухкомпонентной электронной жидкости в образцах с макроскопическими дефектами, приводящими к эффектам памяти

К.С. Денисов,¹ К.А. Барышников,^{1,*} П.С. Алексеев¹

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

*email: barysh.1989@gmail.com

Развита теория магнетотранспорта в двухкомпонентной электронной системе с редкими макроскопическими дефектами. В такой системе определяющую роль играют классические эффекты памяти при рассеянии электронов на дефектах [1] и медленные переходы электронов между компонентами жидкости за счёт межэлектронного рассеяния [2]. Показано, что режим течения зависит от соотношения ширины образца W и характерного размера прикраевого доминирования электронов с фиксированным спином l_R , как это показано на Рис. 1, определяемой темпом переходов электронов между компонентами. В образцах, где $W \gg l_R$, формируется течение единой двухкомпонентной жидкости, проводимость которой описывается объемными формулами Друде, учитывающими эффекты памяти. В этом случае магнетосопротивление является знакопеременным: положительным в малых магнитных полях и отрицательным в больших полях. В узких образцах, когда $W \ll l_R$, переходы с изменением типа электронов не успевают сформировать единую жидкость. Течения каждой из компонент происходят независимо и описываются собственными проводимостями и сопротивлениями с поправками за счет эффектов памяти. Результирующее магнетосопротивление оказывается строго отрицательным. Работа поддержана Российским научным фондом (проект 18-72-10111-П).

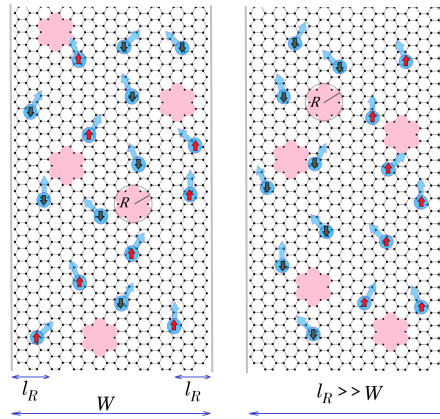


Рис. 1: Течение электронной жидкости со стонеровским расщеплением спиновых подзон в двух образцах разной ширины с макроскопическими дефектами в виде дисков радиуса R . На левой панели изображен случай $W \gg l_R$. На правой панели - случай $W \ll l_R$.

Список литературы

- [1] K. S. Denisov, et. al., J. Phys.: Condens. Matter **33**, 385802 (2021).
- [2] П. С. Алексеев, ФТП **56**, 866 (2022).

Природа ферромагнетизма в GaAs:Mn. Роль прямого обмена

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

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

**email: pavel.petrov@gmail.com*

Общепринятая модель ферромагнетизма в GaAs:Mn, предложенная в 2000 году Дитлом в последние годы подвергается ревизии. Связано это главным образом с появлением новых экспериментальных результатов, свидетельствующих о том, что в ферромагнитных образцах GaAs:Mn уровень химического потенциала находится в примесной зоне, тогда как модель косвенного обмена Дитла полагает его находящимся в зоне валентных связей [1]. В нашей работе мы приводим аргументы в пользу того, что причиной ферромагнетизма в GaAs:Mn может являться механизм прямого обмена между дырками локализованными на акцепторах марганца.

Поставленная нами проблема состоит из двух независимых задач. Во-первых, необходимо показать, что ферромагнитный переход возможен не только для системы обменно взаимодействующих спинов находящихся в узлах регулярной решётки, но и для системы случайно разбросанных примесных атомов обменно взаимодействующих друг с другом. Во-вторых, требуется продемонстрировать, что обменное взаимодействие между двумя примесными атомами может быть ферромагнитным. Традиционный подход, основанный на водородоподобной модели примесного состояния в полупроводниках здесь не работает, так как основное состояние молекулы водорода это синглет и взаимодействие в этом случае будет антиферромагнитным.

Первая задача исследовалась нами в рамках гамильтониана Изинга при помощи нескольких численных методов, таких как метод Метрополиса, метод Ландау-Вэнга, а также метод прямого сэмплирования [2]. После анализа результатов численного моделирования удалось также получить и аналитическое решение задачи. Основной результат заключается в том, что в системе случайно расположенных спинов, обменно взаимодействующих между собой, возможен ферромагнитный фазовый переход, при этом температура перехода равна средней энергии взаимодействия одного спина со всеми остальными спинами.

К настоящему времени можно считать хорошо установленным, что взаимодействие двух локализованных дырок является ферромагнитным. Этот факт весьма подробно исследовался теоретически и был проверен экспериментально, в основном посредством исследования спектральных и поляризационных свойств экситонных комплексов и примесных центров имеющих в своём составе две дырки [3, 4]. Таким образом, главной нерешённой к настоящему времени задачей остаётся исследование тонкой структуры комплекса из двух акцепторов марганца.

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №23-22-00333

Список литературы

- [1] Nitin Samarth, Nature materials **11.5**, 360-361, (2012).
- [2] Н.А. Богословский, П.В. Петров, Н.С. Аверкиев, Письма в ЖЭТФ, **114**(6), 383 (2021).
- [3] Н.С. Аверкиев, С.Ю. Ильинский. ФТТ **36**, 503 (1994).
- [4] P. V. Petrov, I. A. Kokurin, G. V. Klimko, S. V. Ivanov, Yu L. Ivánov, P. M. Koenraad, A. Yu Silov, and N. S. Averkiev, Phys. Rev. B **94**(11), 115307, (2016).

Сильная деформационная зависимость обменного взаимодействия акцептора марганца в GaAs

И.В. Крайнов,* К.А. Барышников, Н.С. Аверкиев

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

*email: igor.krainov@mail.ru

Одним из трендов современной наноэлектроники является изучение магнитных полупроводниковых структур. Их транспортные, оптические и магнитные свойства главным образом определяются электронными и спиновыми свойствами магнитных примесей в решетке полупроводникового кристалла. Распространенными магнитными полупроводниковыми материалами являются разбавленные полупроводники на основе элементов из III и V групп периодической таблицы с магнитными центрами, наиболее ярким представителем данного класса является GaMnAs. Примесь иона марганца в объемном полупроводнике GaAs образует акцептор с наполовину заполненной внутренней d -оболочкой с полным спином $5/2$, который связывает одну дырку в состоянии симметрии Γ_8 с полным моментом $3/2$. Разнообразие магнитных свойств данных акцепторов определяется обменным взаимодействием между внутренней d -оболочкой и дыркой валентной зоны [1]. Однако константа обменного взаимодействия A вводится феноменологически и ее значение является предметом дискуссии при анализе различных экспериментальных данных (см. обзорную работу [1] и ссылки в ней). До недавних пор данная величина считалась не зависящей от внешних параметров, однако в работе [2] для описания спектров рамановского рассеяния при 4.2 К возникла необходимость ввести феноменологическую зависимость константы A от внешней деформации кристалла. Эта же зависимость, как оказалось, помогает объяснить аномальное подавление магнитной восприимчивости центра марганца при высоких температурах около 300 К за счет температурного уширения кристалла, что не было объяснено до сегодняшнего дня. В результате возникает необходимость в микроскопическом анализе величины A , который сможет пролить свет на многие наблюдаемые свойства, не вводя новых феноменологических соотношений.

В данной работе мы приводим расчет величины обменной энергии A из микроскопических соображений. В предположении, что хундовское взаимодействие между d -электронами марганца гораздо больше кулоновского взаимодействия d -оболочки с дыркой, локализованной на примеси, нами продемонстрировано, что обменное взаимодействие определяется лишь подходящей антисимметризацией орбитальных компонент дырочных состояний и антисимметризованной многочастичной орбитальной компонентой всех пяти d -электронов. При этом в работе также показано, что для вычисления обменных интегралов достаточно использовать представление из четырех волновых функций акцептора марганца, а не всех 24 его состояний, определяющихся полными моментами $F = 1, 2, 3, 4$. Рассчитано влияние деформации на константу обменного взаимодействия и показано, что деформация может приводить к существенным изменениям ее величины на десятки процентов. Данное исследование открывает возможность микроскопического анализа константы обмена на марганце и многих других примесных центрах в полупроводниках от внешних параметров. Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 22-12-00139.

Список литературы

- [1] Н.С. Аверкиев, А.А. Гуткин, ФТТ, **60**(12), 2275 (2018).
- [2] I.V. Krainov, J. Debus, N.S. Averkiev et al., Phys. Rev. B, **93**, 235202 (2016).

Спин-орбитальное расщепление в низкосимметричных квантовых ямах на основе кубических кристаллов

Г.В. Будкин,^{1,*} С.А. Тарасенко¹

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

*email: gbudkin@gmail.com

В полупроводниковых структурах без центра пространственной инверсии спин-орбитальное взаимодействие приводит к спиновому расщеплению электронных и дырочных подзон даже в нулевом магнитном поле. Принято считать, что в квантовых ямах есть два вклада в такое расщепление: вклады Рашбы и Дрессельхауза, обусловленные структурной и кристаллической асимметрией соответственно. Нами показано, что в квантовых ямах на основе кристаллов с кубической решеткой (алмаза, цинковой обманки) в гамильтониане расщепления появляется дополнительный вклад. Этот вклад обусловлен кубической формой элементарной ячейки кристалла и структурной асимметрией квантовой ямы, но не требует отсутствия центра инверсии в кристалле. Эффективное магнитное поле, соответствующее данному спиновому расщеплению, направлено по нормали к квантовой яме, а его величина определяется структурной асимметрией, которую можно контролировать напряжением на затворе.

Показано, что эффективный гамильтониан линейного по волновому вектору $\mathbf{k}$ спин-орбитального расщепления в квантовых ямах с ориентацией $(0lh)$, обусловленного структурной асимметрией, имеет вид

$$H_{\text{SO}} = \alpha_1 \sigma_y k_x - \alpha_2 \sigma_x k_y + \zeta \sigma_z k_x,$$

где σ_j — матрицы Паули, $x \parallel [100]$ и $y \parallel [0h\bar{l}]$ — оси в плоскости ямы. Первые два слагаемых соответствуют анизотропному спин-орбитальному взаимодействию Рашбы, а последнее, связывающее нормальную компоненту спина с импульсом вдоль x , соответствует описанному выше спин-орбитальному взаимодействию. Анализ показывает, что этот дополнительный вклад появляется как для электронов, так и для дырок в квантовых ямах любых кристаллографических ориентаций кроме ям, выращенных вдоль осей высокой симметрии $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$.

Проведены численные расчеты энергетического спектра дырок для квантовых ям GaAs/AlGaAs и определены параметры эффективного гамильтониана. Развита аналитическая микроскопическая теория спин-орбитального расщепления и получены выражения для параметров спин-орбитального взаимодействия, которые хорошо согласуются с результатами численных расчетов [1]. Показано, что предложенный тип спин-орбитального расщепления является доминирующим для тяжелых дырок в широком диапазоне ширин квантовых ям и направлений роста; эффект наиболее выражен в структурах с ориентацией (013) .

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-12-00211).

Список литературы

- [1] G. V. Budkin and S. A. Tarasenko, Phys. Rev. B **105**, L161301 (2022)

Плазменные колебания в ограниченных двумерных электронных системах

И.В. Загороднев¹, В.А. Волков¹, А.А. Заболотных¹, Д.А. Родионов^{1,2,*}

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

²*МФТИ, Долгопрудный, Россия*

*email: *igor.zagorodnev@gmail.com*

Относительно недавно возник интерес к изучению плазменных колебаний в двумерных электронных системах в режиме, когда важны эффекты электромагнитного запаздывания, т.е. в структурах, характерные размеры которых сравнимы с длиной волны возбуждающего электромагнитного излучения. Оказалось, например, что в таких системах затухание плазменных колебаний ведет себя нетривиально [1].

В данной работе, основанной на публикациях [2-4], рассмотрены плазменные колебания, возникающие в ограниченных двумерных электронных системах на примере двух геометрий – полоса и диск – в том числе в ситуации когда важны эффекты электромагнитного запаздывания. Кроме того, учтено наличие рядом с 2D системой металлического электрода (затвора). В пределе, когда электрод расположен на расстоянии много меньших характерной длины волны плазменных колебаний, возможно точное решение, как в диске, так и в полосе, в том числе и во внешнем магнитном поле (в рамках так называемого приближения локальной ёмкости). Интересно, например, что в таком случае затухание плазменных резонансов в таких системах обычно меньше, чем темп релаксации носителей (обратное время рассеяния). Однако, в таком предельном случае отсутствует радиационное затухание плазмонов, которое может быть важно в системах с высокой подвижностью носителей заряда, например, в квантовых ямах GaAs/AlGaAs при гелиевых температурах. Радиационное затухание может быть учтено либо по теории возмущений, либо в рамках других (приближенных) методов, которые также будут обсуждены. Будет проанализирована нетривиальная зависимость затухания плазменных колебания от размера и других параметров системы.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ № 21-12-00287.

Список литературы

- [1] P.A. Gusikhin, V.M. Muravev, A.A. Zagitova, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett. **121**, 176804 (2018).
- [2] I.V. Zagorodnev, D.A. Rodionov, A.A. Zabolotnykh, Phys. Rev. B **103**, 195431 (2021).
- [3] D.A. Rodionov, I.V. Zagorodnev, Phys. Rev. B **106**, 235431 (2022).
- [4] I.V. Zagorodnev, A.A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, and V.A. Volkov, Nanomaterials **13**, 975 (2023).

Нелинейный коэффициент Холла в $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se})_3$ пленках трехмерного топологического изолятора

Н.П. Степина,^{1,*} А.В. Шумилин,^{2,3} А.Ю. Кунцевич,⁴ А.О.Баженов,¹ Д.С.
Ищенко,¹ О.Е. Терещенко^{1,5}

¹Институт физики полупроводников, Новосибирск, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт Петербург, Россия

³Институт им. Джозефа Стефана, Любляна, 1000, Словения

⁴Физический институт им П.Н. Лебедева, РАН, 119991 Москва, Россия

⁵Новосибирский Государственный Университет, 630073, Новосибирск, Россия

*email: nstepina@mail.ru

Проведено исследование магнетосопротивления и эффекта Холла в пленках четырех-компонентного топологического изолятора на основе халькогенидов висмута и сурьмы (BSTS). Пленки выращены с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si(111). Обнаружено положительное магнетосопротивление (МС), которое не насыщается вплоть до полей 12 Т. При описании МС в малых полях формулой Хиками-Ларкина-Нагаоки [1] наблюдаются повышенные значения префактора α , не характерные для модели слабой антилокализации. Высоко-полевая часть МС слабо чувствительна к направлению магнитного поля и может быть описана с учетом электрон-электронного взаимодействия, которое изменяется в магнитном поле за счет эффекта Зеемана из-за достаточно больших значений g-фактора для таких пленок. Однако, вклад электрон-электронного взаимодействия в МС, измеренное в перпендикулярном к поверхности образца поле, не приводит к уменьшению величины α до значений, характерных для поправки, связанной с эффектом слабой антилокализации.

Подробный анализ эффекта Холла показал, что коэффициент Холла немонотонен и сильно изменяется в слабых полях, причем величина его нелинейности зависит от концентрации носителей заряда и достигает 10-20 % в образцах с низкой электронной плотностью. Эффект практически не зависит от температуры вплоть до 20К. Для совместного описания МС и эффекта Холла предложена модель, основанная на открытии щели за счет эффекта Зеемана в дираковском спектре поверхностных состояний и соответствующем перераспределении транспортных потоков. Этот механизм совместно с эффектом слабой антилокализации и электрон-электронного взаимодействия позволяет качественно объяснить наблюдаемые экспериментальные эффекты.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда и правительства Новосибирской области №22-22-20074.

Список литературы

[1] S. Hikami, A. Larkin, Y. Nagaoka, Prog. Theor. Phys. **63**, 707 (1980).

Геликоидальные кристаллы: зонная структура, мультикритическое поведение и топологические дефекты

Р.А. Ниязов,^{1,2,*} Д.Н. Аристов,^{1,2} В.Ю. Качоровский²

¹НИЦ “Курчатовский Институт” - ПИЯФ, Гатчина, Россия

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

*email: ramilniyazov@gmail.com

Рассмотрен геликоидальный кристалл (ГК) на основе туннельно-связанных краевых состояний, возникающих в массиве упорядоченных антиточек в двумерном топологическом изоляторе (см. Рис. 1а, взятый из экспериментальной работы [1]). Рассчитана зонная структура ГК для модели 1D массива, помещенного в магнитное поле. Показано, что при целых и полужелтых значениях магнитного потока через антиточку (АТ) запрещенные зоны ГК закрываются. При малом отклонении магнитного потока от этих значений возникают массивные дираковские конусы (ДК), расстояние по энергии между которыми можно контролировать чисто электрическим способом (затворными электродами). Электрон-электронное взаимодействие приводит к мультикритическому поведению ГК, которое проиллюстрировано на фазовой диаграмме (см. Рис.1б) в плоскости α (туннельная связь между АТ) и β (удвоенный угол между осями квантования в соседних АТ). Черные линии разделяют три фазы: “независимые кольца”, “независимые плечи” и “спин-флип киральные каналы”.

При наличии дефектов в ГК, например, стенки между областями колец с большим и малым радиусом, возникает пара локализованных состояний (топологически-защищенный кубит) с энергиями, лежащими в середине запрещенных зон массивных ДК (см. Рис. 1с). Расщепление между уровнями энергии кубита можно контролировать как магнитным полем, так и чисто электрически. Такие состояния можно использовать для квантовых вычислений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 20-12-00147 (продление 23-12-45016).

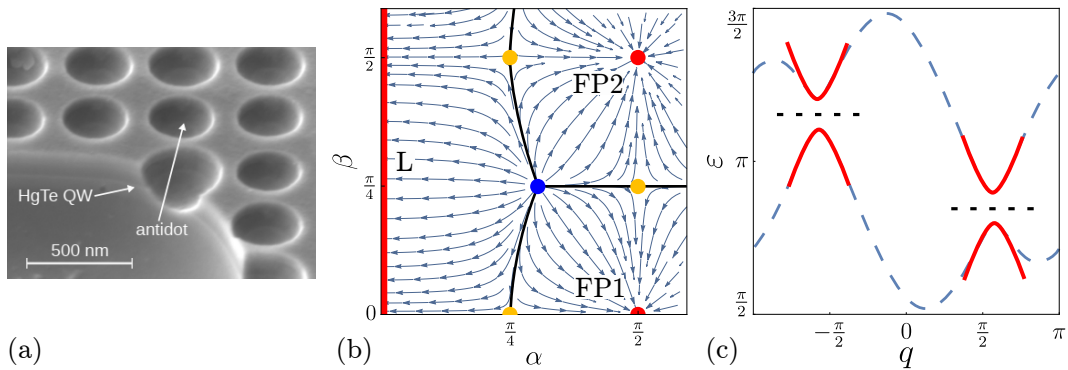


Рис. 1: (а) Массив АТ в 2D HgTe (взято из [1]); (б) Мультикритическое поведение во взаимодействующем случае: синий цвет — полностью неустойчивая мультикритическая фиксированная точка, разделяющая три фазы (красные цвета), соответствующие линии L (независимые кольца) и фиксированным точкам FP1 (независимые плечи) и FP2 (спин-флип киральные каналы), желтый цвет — неустойчивые седловые точки; (с) Топологически-защищенные локализованные состояния (черный пиксель), возникающие посередине запрещенных зон ГК (красным показаны массивные ДК).

Список литературы

[1] J. Ziegler, Quantum transport in HgTe topological insulator nanostructures, PhD, Universität Regensburg (2019).

Эффект де Гааза-ван Альфена и квантовые осцилляции как функция температуры в коррелированных изоляторах

В.А. Зюзин,¹

¹*Институт Теоретической Физики им. Л. Д. Ландау, Черноголовка, Россия*

**email: zyuzin.vova@gmail.com*

В данной работе [1] теоретически изучены осцилляции де Гааза-ван Альфена в изоляторах. Изоляторы в нашей работе описываются моделью, в которой энергетическая щель образуется в результате гибридизации энергетических уровней в точке их пересечения за счёт взаимодействия между фермионами, - моделью экситонного изолятора [2]. Изучен механизм, при котором энергетическая щель, вычисленная самосогласованным образом, становится периодической функцией обратного магнитного поля. Это и приводит к осцилляциям де Гааза-ван Альфена в нашем случае. Амплитуда экспоненциально подавлена в меру энергетической щели и магнитного поля. Также показано, что амплитуда таких осцилляций сама есть периодическая функция обратной температуры с периодом, определяемым комбинацией из энергетической щели и магнитного поля.

Список литературы

1. V.A. Zyuzin, “De Haas-van Alphen effect and quantum oscillations as a function of temperature in correlated insulators’ arXiv:2302.13923.
2. Л.В. Келдыш, Ю.В. Копаев, “Возможная неустойчивость полуметаллического состояния относительно кулоновского взаимодействия”, Физика твердого тела, **6**, 2791 (1964).

Локальная интерферометрия двойной андреевской квантовой точки

С.В. Аксенов^{1,*}

¹*Институт физики им. Л. В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск,
Россия*

*email: *asv86@iph.krasn.ru*

В современных экспериментах с гибридными нанопроволоками полупроводник/сверхпроводник наличие всевозможных андреевских связанных состояний с нулевой энергией, характеризующихся разной степенью перекрытия майорановских волновых функций, является общей проблемой, которая значительно усложняет обнаружение истинного майорановского связанного состояния [1].

В данной работе с учетом пространственной неоднородности экспериментально исследуемых образцов нанопроводов анализируются особенности интерференционного транспорта в одномерной П-образной гетероструктуре (устройстве), в которой две нормальные проволоки (или плеча) разделены сверхпроводящим сегментом и туннельно связаны с нормальным контактом [2,3]. Поскольку андреевское отражение на двух N/S границах устройства с плавно меняющимся электростатическим потенциалом и амплитудой сверхпроводящего спаривания приводит к возникновению связанных состояний, низкоэнергетический интерференционный транспорт описывается в рамках модели двух невзаимодействующих андреевских уровней или двойной андреевской квантовой точки. В рамках этой модели проанализирован ряд предельных случаев, что позволило выделить свойства эффекта Ааронова-Бома, уникальные для разных типов андреевских связанных состояний, таких как: объемное андреевское состояние, неоднородное андреевское состояние и майорановское состояние. В частности, показано, что отклик каждого состояния можно распознать, анализируя совместно период осцилляций Ааронова-Бома и положения экстремумов колебаний проводимости, устойчивых к изменению параметров системы. Полученные результаты остаются справедливыми в ситуации слабого случайного беспорядка в устройстве и при ненулевых температурах, соответствующих экспериментальным.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 19-12-00167.

Список литературы

- [1] E. Prada et al., Nat. Rev. Phys. **2**, 575 (2020).
- [2] S.V. Aksenov, Phys. Rev. B **107**, 085417 (2023).
- [3] S.V. Aksenov, J. Phys.: Cond. Mat. **34**, 255301 (2022).

Кинетика линейной и циркулярной поляризации экситонной фотолюминесценции в коллоидных наноплателетах CdSe/CdS

О.О. Смирнова,^{1,*} А.В. Родина¹

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

*email: smirnova.olga248@gmail.com

Исследование поляризации фотолюминесценции (ФЛ) коллоидных наноплателетов CdSe/CdS, в которых впервые для подобных наноструктур наблюдались эффекты оптического выстраивания и оптической ориентации экситонов [1], позволяет определить параметры тонкой структуры экситонов и времена их релаксации.

В работе представлен теоретический анализ кинетик эффектов оптического выстраивания P_l^l и оптической ориентации P_c^c экситонов, а также поворота плоскости линейной поляризации P_l^l в магнитном поле в геометрии Фарадея. Модель учитывает наличие анизотропного расщепления между линейно поляризованными состояниями светлого экситона $|X\rangle$ и $|Y\rangle$, связанного с анизотропией формы наноплателетов в плоскости [2], а также отличие времен продольной и поперечной спиновой релаксации. Сравниваются эффекты в одиночных наноплателетах (или ориентированных ансамблях) и в ансамбле с их произвольной ориентацией в плоскости подложки. На рис. 1 представлены характерные кинетики эффектов от ансамбля в отсутствии магнитного поля и в поле 6 Тл. В магнитном поле появляется ненулевой поворот плоскости линейной поляризации, дополнительные вклады в эффекты оптического выстраивания и оптической ориентации и учащаются осцилляции. Обсуждается также затухание осцилляций поляризации, обусловленное возможной дисперсией размеров наноплателетов в плоскости и экситонных g -факторов.

Дальнейший анализ экспериментальных данных позволит уточнить экситонные параметры, согласованно описывающие как кинетические, так и стационарные зависимости поляризаций ФЛ от величины магнитного поля в геометрии Фарадея [1].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-52-12064).

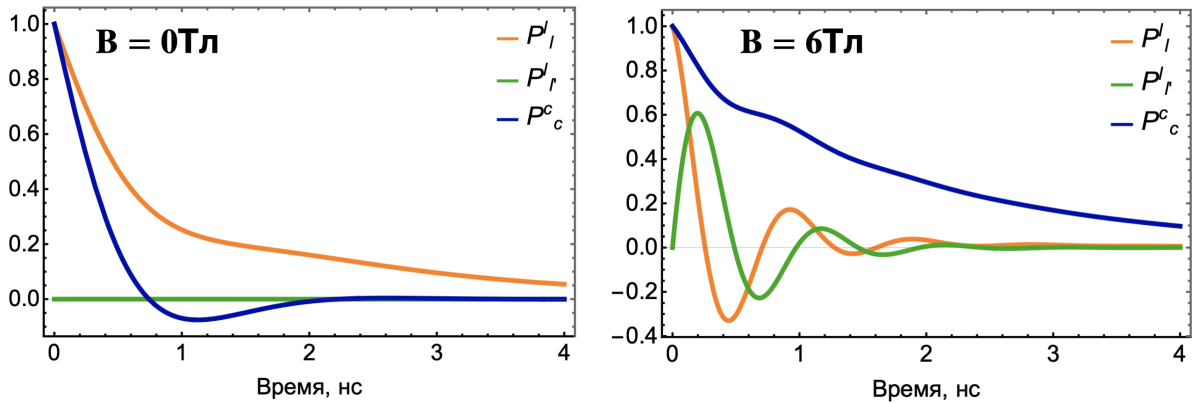


Рис. 1: Характерные кинетики эффектов в отсутствии магнитного поля и в поле 6 Тл в геометрии Фарадея.

Список литературы

- [1] O.O. Smirnova et al., arXiv:2212.06134v1, 2022.
- [2] S. Goupalov, Phys. Rev. B, **74**, 113305 (2006).

Стендовые доклады

Эффекты интерференции Ландау-Зенера-Штюкельберга-Майораны и гармоника электрического дипольного спинового резонанса в двойной квантовой точке со спин-орбитальным взаимодействием

Д.В. Хомицкий^{1,*}, С.А. Студеникин²

¹ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, физический ф.-т, пр. Гагарина, 23, 603950 Нижний Новгород, Россия

² Emerging Technologies Division, National Research Council of Canada, Ottawa, ON-K1A0R6, Canada

* khomitsky@phys.unn.ru

Эффекты интерференции Ландау-Зенера-Штюкельберга-Майораны (ЛЗСМ) [1, 2] возникают при динамическом пересечении уровней в атомных и твердотельных структурах и характеризуются нетривиальной картиной распределения интенсивностей переходов в пространстве параметров. Представляет интерес исследование и учёт таких эффектов в спин-зависимых явлениях, таких как электрический дипольный спиновый резонанс (ЭДСР) [3], который может использоваться для управления спина с помощью электрического поля в полупроводниковых структурах с сильным спин-орбитальным взаимодействием (СОВ), в которых с использованием локальных затворов созданы квантовые точки [4]. В этом режиме частота электрического поля ω совпадает с энергией зеемановского расщепления спиновых уровней Δ_z , обеспечивая переворот спина при наличии СОВ. В наших предыдущих работах экспериментально [4] и теоретически [5, 6] были исследованы механизмы туннелирования и переворота спина в двойной квантовой точке на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs, в которой носителями заряда выступают дырки. Были обнаружены различные режимы динамики в пространстве параметров системы, в том числе проявления интерференции ЛЗСМ при туннелировании и перевороте спина.

В данном докладе мы фокусируемся на протекании ЭДСР и проявлении его гармоник при наличии эффективного туннелирования и ЛЗСМ-интерференции в системе с двойной квантовой точкой, отвечающей экспериментам [4]. Минимальная модель является четырёхуровневой, что выходит за рамки классических моделей двухуровневых систем [1, 2]. Моделирование показывает, что в некоторых точках в пространстве параметров переворот спина на частоте электрического поля 2..3 ГГц достигается в умеренных полях с амплитудой 50..100 μeV за сравнительно короткое время (10-20 нс), которое меньше времени спиновой когерентности для дырок. Кроме того, переворот спина в выделенной квантовой точке возможен не только на основной гармонике ЭДСР при $\omega=\Delta_z$, но и на более высоких гармониках $k\omega=\Delta_z$, вплоть до $k=10$. Важную роль играет туннелирование в соседнюю квантовую точку, усиливающее спиновую динамику на высоких гармониках, которые могут быть полезны в экспериментах, когда основная гармоника трудно достижима по частоте в силу аппаратных ограничений. Обсуждаются механизмы данного эффекта и его приложения для схем управления спином в полупроводниковых квантовых точках.

Список литературы

- [1] Ф. Ди Джакомо, Е.Е. Никитин, УФН, **175** (5), 545 (2005).
- [2] S.N. Shevchenko, S. Ashhab, and F. Nori, Phys. Rep. **492**, 1 (2010).
- [3] E. I. Rashba and Al. L. Efros, Phys. Rev. Lett. **91**, 126405 (2003).
- [4] A. Bogan, S. Studenikin, M. Korkusinski *et al*, Phys. Rev. Lett. **120**, 207701 (2018).
- [5] D.V. Khomitsky and S.A. Studenikin, Phys. Rev. B **106**, 195414 (2022).
- [6] Д.В. Хомицкий, Н.А. Запруднов, ФТП **56** (10), 973 (2022).

Изменение продольного сопротивления в режиме квантового эффекта Холла в условиях электронного спинового резонанса

В.Е. Бисти*

ИФТТ РАН, Черногоровка, Россия

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

Предлагается объяснение влияния микроволнового излучения на величину продольного сопротивления в условиях электронного спинового резонанса (ESR) для четных и нечетных факторов заполнения в режиме квантового эффекта Холла. В работе [1] ESR в двумерной электронной системе был исследован экспериментально вблизи четных и нечетных факторов заполнения ν в режиме целочисленного квантового эффекта Холла в гетероструктурах ZnO/MgZnO при $T = 0.5K$. Детектирование ESR основывалось на сильной чувствительности продольного сопротивления двумерного канала R_{xx} к микроволновому излучению. Спиновый резонанс наблюдался как острый пик в изменении сопротивления δR_{xx} при медленном изменении магнитного поля при постоянной частоте микроволнового излучения. Воздействие ESR на продольное сопротивление R_{xx} оказалось сравнимым по величине для четного и нечетного факторов заполнения, но противоположных знаков. Наблюдаемое явление указывает на различные механизмы воздействия микроволнового излучения в зависимости от спинового состояния системы. Гетероструктуры MgZnO/ZnO относятся к сильно коррелированным системам, в которых электрон-электронное взаимодействие играет существенную роль, поэтому была использована модель Ферми-жидкости (параметры квазичастиц брались из работы [2]). В отсутствие микроволнового излучения продольное сопротивление вблизи целочисленных факторов заполнения носит активационный характер и зависит от температуры, вызывающей отклонение факторов заполнения от целочисленных значений. При низких температурах квазиэлектроны и квазидырки существуют в основном в виде нейтральных возбуждений экситонного типа.

Микроволновое поглощение в условиях ESR вызывает изменение заполнения уровней Ландау квазичастиц. Для окрестности нечетных факторов заполнения поглощение не мало. В процессе образуются спиновые экситоны дополнительно к уже существующим, что можно описать увеличением температуры, приводящим к росту сопротивления. Для окрестности четных факторов заполнения поглощение невелико и зависит от спиновой поляризации системы (отклонения фактора заполнения от целочисленного) при ненулевой температуре. Поглощение приводит к переходу существующих комбинированных возбуждений с $S_z = -1$ в расположенные выше по энергии возбуждения с $S_z = 0$. Уменьшение числа определяющих проводимость возбуждений можно представить как понижение их эффективной температуры, что приводит к уменьшению сопротивления.

Список литературы

- [1] A. V. Shchepetilnikov, A. R. Khisameeva, Yu. A. Nefyodov, and I. V. Kukushkin. Phys. Rev. B **104**, 075437 (2021).
- [2] V.V. Solovyev and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B **96**, 115131 (2017).

Индукцированный беспорядком переход в трубчатую фазу в анизотропных двумерных материалах

М. В. Парфенов,^{1,2,*} В. Ю. Качоровский³, И. С. Бурмистров^{4,2}

¹*Department of Physics, HSE University, 101000 Moscow, Russia*

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

³*Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia*

⁴*L. D. Landau Institute for Theoretical Physics, Semanova 1-a, 142432, Chernogolovka, Russia*

*email: maksimqwery@gmail.com

В последние годы особое внимание научного сообщества сосредоточено на изучении двумерных материалов. Основное развитие данного направления было связано с изучением свойств графена. С точки зрения теории упругости свободно-подвешенный лист графена оказывается идентичным изотропной двумерной пластине. В терминах формализма функционала Гинзбурга-Ландау было получено множество результатов, основной из которых это аномальная упругость - степенная зависимость изгибной жесткости графена от размера системы [1]. На основании этого, сравнивая влияние тепловых флуктуаций и аномальной упругости можно получить, что при конечной температуре (или конечной силе беспорядка для «грязного» случая) мембрана переходит в смятую фазу [2]. Для анизотропных материалов в «чистом» случае, было получено, что при некоторой конечной температуре происходит переход в трубчатую фазу. Также было показано существование бесконечного числа анизотропных плоских фаз, которые характеризуются эллиптическими анизотропными изгибной жесткостью и модулем Юнга [3]. В нашей работе [4] развита теория аномальной упругости для двумерных гибких материалов с орторомбической кристаллической структурой и замороженным беспорядком. Аналогично «чистому» случаю, мы предсказываем наличие бесконечного числа плоских фаз с анизотропными изгибной жесткостью и модулем Юнга, которые показывают степенной скейлинг при увеличении размеров системы, который контролируется той же критической экспонентой, что и в чистом изотропном случае. Под воздействием температуры или беспорядка плоские фазы разрушаются посредством перехода скомкования (crumpling transition). Аналогичный переход для чистых материалов происходит при аномально высоких температурах, тогда как трубчатая фаза, переход в которую вызван беспорядком, может существовать при комнатных температурах. Результаты данной работы применимы к анизотропным монослоям, допированным адатомами или подвергнутым бомбардировке тяжелыми атомами.

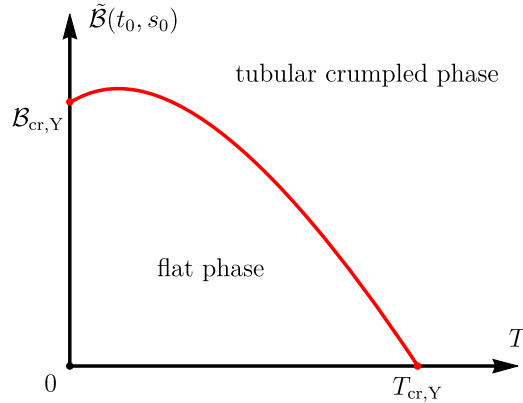


Рис. 1. Фазовая диаграмма перехода в трубчатую фазу

Список литературы

- [1] Nelson, D. R., and L. Peliti. Fluctuations in membranes with crystalline and hexatic order. *Journal de physique* 48.7 (1987): 1085-1092.
- [2] Paczuski, Maya, Mehran Kardar, and David R. Nelson. Landau theory of the crumpling transition. *Physical review letters* 60.25 (1988): 2638.
- [3] Burmistrov, I. S., et al. Emergent continuous symmetry in anisotropic flexible two-dimensional materials. *Physical Review Letters* 128.9 (2022): 096101.
- [4] Parfenov, M. V., V. Yu Kachorovskii, and I. S. Burmistrov. Disorder-driven transition to tubular phase in anisotropic two-dimensional materials. *Phys. Rev. B* 106, 235415

Квантовые вычисления на границе шестиугольной модели Китаева с беспорядком

И. Л. Тимошук^{1,*}, К. С. Тихонов² и Ю. Г. Махлин^{1,2}

¹Международная лаборатория физики конденсированного состояния,
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

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

*email: iltimoshuk@edu.hse.ru

Использование краевых мод для проведения квантовых вычислений может стать одним из способов реализации квантовых компьютеров, топологически защищенных от внешних шумов. Способность киральных краевых состояний самостоятельно перемещаться вдоль границы позволяет упростить проведение операции переплетения, что облегчает выполнение различных квантовых операций. Нами показана возможность проведения квантовых вычислений с использованием краевых состояний в двумерной шестиугольной модели Китаева [1, 2].

Были изучены краевые состояния для различных типов границы образца модели Китаева и предложены возможные способы проведения квантовых операций с использованием краевых состояний. Нами описаны способы взаимодействия внешнего кубита с краем образца, позволяющие 'записать' состояние кубита в виде суперпозиции краевых мод. Мы показали, как с помощью данного подключения можно провести операцию обмена состояний двух кубитов, взаимодействующих с краем образца модели Китаева. Также была численно и аналитически исследована зависимость точности проведения данной операции от различных типов шумов - статического δ -коррелированного беспорядка в образце, δ -коррелированного $1/f$ -шума и пространственно однородных шумов.

Список литературы

- [1] I. L. Timoshuk, Y. G. Makhlin, arXiv:2302.10101 (2023).
- [2] I. L. Timoshuk, K. S. Tikhonov, Y. G. Makhlin, arXiv:2302.10123 (2023).

Анизотропное расщепление экситонного спектра в квантовых точках из сульфида свинца

И.Д. Авдеев,^{1,*} М.О. Нестоклон,¹ С.В. Гупалов^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Jackson State University, Jackson, Mississippi, USA

*email: ivan.avdeev@mail.ioffe

Квантовые точки из сульфида свинца (PbS) являются перспективной платформой для инфракрасной оптоэлектроники и квантовой оптики. Развитие методов синтеза и спектроскопии одиночных квантовых точек [1-3] остро ставит вопрос об их теоретическом моделировании. Ключевой особенностью PbS является его многодолинная зонная структура с экстремумами в L долинах, которая существенно осложняет описание данных систем и требует использования расширенной $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ модели для корректного учета долинных состояний.

Нами рассмотрен механизм расщепления оптических спектров квантовых точек из PbS за счет анизотропии формы. Анизотропные расщепления спектров низкотемпературной фотолюминесценции наблюдались экспериментально в работе [2], где был предложен другой механизм расщепления — за счет поверхностных дефектов.

На Рис. 1 показан результат расчета анизотропных расщеплений оптических спектров dE/μ в квантовых точках с формой эллипсоида вращения (сфероида), которая задается направлением оси [001], [110] или [111] и параметром анизотропии μ , определяющим его полуоси $a = b = R(1 - \mu/3)$, $c = R(1 + 2\mu/3)$. Величина расщепления между продольной и поперечной поляризацией определена как

$$dE = E_l - E_t, \quad E_\lambda = \sum F_{\lambda,X} E_X / \sum F_{\lambda,X}, \quad (1)$$

где $F_{\lambda,X}$ — сила осциллятора и E_X — энергия экситонного уровня X [4], что позволяет исключить случайный разброс величины за счет долинного расщепления.

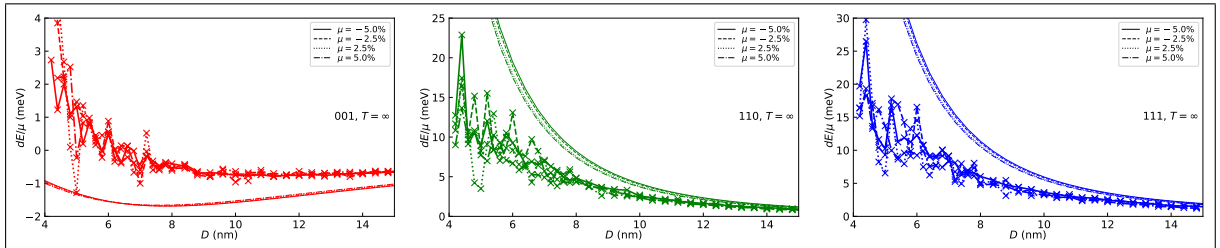


Рис. 1: Анизотропные расщепления в сфероидальных КТ из PbS. Линиями показан расчет в рамках анизотропной $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ теории, символами «x» — расчет методом сильной связи [4].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-72-00121, <https://rscf.ru/project/22-72-00121/>.

Список литературы

- [1] Zh. Hu *et al*, Nano Lett. **19**, 12, 8519 (2019),
- [2] Y. Kim *et al*, Small, **17**, 13, 2006977 (2021),
- [3] Sachidananda Krishnamurthy *et al*, ACS Nano **15** (1), 575 (2021),
- [4] I.D. Avdeev, M.O. Nestoklon, S.V. Goupalov, Nano Lett. **20**, 12, 8897 (2020).

Многократные андреевские отражения в диффузных SINIS и SIFIS контактах

А.В. Полькин,^{1,*} П.А. Иоселевич^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия

²Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия
*email: arpolkin@gmail.com

В последнее время изучение различных транспортных свойств сверхпроводящих систем являлось важной темой научных исследований. Одной из уникальных особенностей таких систем является наличие в них Андреевских отражений, то есть процесса, при котором электрон из нормальной области отражается от границы со сверхпроводником в виде дырки с переносом куперовской пары в сверхпроводник. В частности следствием этого эффекта является нетривиальный вид вольт-амперной характеристики, в которой наблюдаются [5] особенности на напряжениях $eV = 2\Delta/n$ в дифференциальной проводимости. Такого рода особенности были получены в чистом случае при помощи уравнения Боголюбова-де Жена [3], а также численно для диффузных структур с идеальным контактом между сверхпроводником и металлом [2] и аналитически для контактов с непрозрачной границей со сверхпроводником [1].

В нашей работе [4] в формализме уравнения Узаделя мы изучили длинный контакт с туннельными границами с учётом сильной термализации. Мы предсказываем, что даже при наличии сильной термализации андреевские отражения будут генерировать особенности в дифференциальной проводимости, хотя и нечётная серия отражений будет несколько подавлена. При учёте слабого обменного поля особенности, порождаемые андреевскими отражениями, будут расщепляться из-за наличия спина на величины порядка обменной энергии. Мы полагаем, что такое расщепление является прямым следствием термализации и связано с необходимостью модернизации классического метода вычисления положений особенностей Андреевских отражений в системах с сильным взаимодействием с подложкой. Результаты данной работы относятся к длинным диффужным контактам с туннельными границами при достаточно низких температурах, к которым приложено постоянное напряжение.

Список литературы

- [1] E. V. Bezuglyi, E. N. Bratus, V. S. Shumeiko, G. Wendin, and H. Takayanagi. Circuit theory of multiple Andreev reflections in diffusive SNS junctions: The incoherent case. *Physical Review B*, 62(21), 2000.
- [2] J. C. Cuevas, J. Hammer, J. Kopu, J. K. Viljas, and M. Eschrig. Proximity effect and multiple Andreev reflections in diffusive Superconductor–Normal-metal–Superconductor junctions. *Phys. Rev. B*, 73:184505, May 2006.
- [3] M. Octavio, M. Tinkham, G. E. Blonder, and T. M. Klapwijk. Subharmonic energy-gap structure in superconducting constrictions. *Phys. Rev. B*, 27:6739–6746, Jun 1983.
- [4] A. V. Polkin and P. A. Ioselevich. Multiple andreev reflections in diffusive sinis and sifis junctions. 2022.
- [5] Rafael Taboryski, Jonatan Kutchinsky, Jorn Bindslev Hansen, Morten Wildt, Claus B. Sorensen, and Poul Erik Lindelof. Multiple andreev reflections in diffusive sns structures. *Superlattices and Microstructures*, 25(5):829–837, 1999.

Диффузионные моды в двумерном фермионном газе с диссипативной динамикой, сохраняющей число частиц

А.А. Люблинская^{1,2,*} И.С. Бурмистров^{2,#}

¹*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

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

*email: *lyublinskaya.aa@phystech.edu*

#email: *burmi@itp.ac.ru*

В последнее время возрос интерес к изучению поведения многочастичных систем в неравновесных состояниях. Развитие экспериментальных платформ, моделирующих такие системы (например, ультрахолодные атомы и экситон-поляритонные системы), влечёт необходимость построения соответствующей теории.

В данной работе рассматривается двухзонная диссипативная фермионная система, предложенная в статье [1]. Это двумерный фермионный газ с квадратичным спектром, соответствующим топологическому изолятору, и подверженный действию диссипации в рамках уравнения Горини-Косаковски-Сударшан-Линдблада (ГКСЛ). Введённые операторы Линдблада сохраняют число частиц и нацелены на перенос заселённости из верхней зоны спектра гамильтониана в нижнюю. Диссипация задумана так, чтобы стабилизировать основное состояние гамильтониана, dark state, соответствующее полному заполнению нижней зоны за счёт опустошения верхней.

В ещё не опубликованной статье [2] показано, что в исследуемой модели есть интервал пространственных и временных масштабов с диффузионным движением квазичастиц. Подчеркнём, что диффузия возникает за счёт операторов “квантовых прыжков” в отсутствии какого бы то ни было беспорядка. Целью нашей работы является более полное описание диффузного режима.

С помощью подхода келдышевского функционального интеграла для уравнения ГКСЛ [3] нами получено выражение для диффузора, описывающего динамику квазичастиц вблизи дна верхней зоны. Выведенный коэффициент диффузии обратно пропорционален силе диссипации и совпадает с результатом работы [2]. Также была вычислена собственная энергия диффузонов, которая связана с диаграммами за рамками лестничного приближения.

Работа поддержана проектом РНФ 22-22-00641.

Список литературы

- [1] F. Tonielli, J. C. Budich, A. Altland, S. Diehl, Phys. Rev. Lett. **124**, 240404 (2020).
- [2] P. A. Nosov, D. S. Shapiro, M. Goldstein, I. S. Burmistrov, arXiv:2301.05258 (2023).
- [3] L. M. Sieberer, M. Buchhold, S. Diehl, Rep. Prog. Phys. **79**, 096001 (2016).

Тензоры внутрислоевых проводимости и сопротивления в магнитном поле в квазидвумерных слоистых металлах

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

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

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

³ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

*email: 5taras@mail.ru

Развивается теория поперечного магнетосопротивления в слоистых квазидвумерных металлах. Используя формулу Кубо-Стреды [1,2], мы вычисляем холловскую внутрислоевую проводимость в магнитном поле, перпендикулярном проводящим слоям квазидвумерного металла, пренебрегая межэлектронным взаимодействием и влиянием фононов. Мы выводим аналитические выражения для амплитуды и фазы магнитных квантовых осцилляций и так называемых медленных (разностных) осцилляций и анализируем их поведение в зависимости от нескольких параметров: напряженности магнитного поля, интеграла межслоевого перескока электронов и ширины уровней Ландау. Магнитные квантовые осцилляции, как и медленные осцилляции, внутрислоевой и межслоевой проводимостей приблизительно находятся в противофазе в слабом магнитном поле и синфазны в сильном поле. Амплитуда медленных осцилляций холловской компоненты внутрислоевой проводимости меняет знак при $\omega_c \tau_0 = 1/\sqrt{3}$ в отличие от диагональной компоненты, меняющей знак при $\omega_c \tau_0 = \sqrt{3}$ [3], где ω_c – циклотронная частота, τ_0 – время свободного пробега электронов в нулевом магнитном поле. Мы также находим тензор магнетосопротивления, выписывая выражения для его магнитных квантовых и медленных осцилляций. Амплитуда медленных осцилляций холловской и диагональной компонент тензора внутрислоевого сопротивления также зануляются при особых значениях $\omega_c \tau_0$. При вычислении тензора магнетосопротивления встаёт важный вопрос: следует ли его находить из усреднённого по термодинамическому ансамблю тензора магнетопроводимости или усреднять по термодинамическому ансамблю уже после обращения тензора магнетопроводимости при нулевой температуре. В режиме сильных квантовых осцилляций ответы заметно различаются. Полученные результаты полезны для анализа экспериментальных данных по магнетосопротивлению в различных сильно анизотропных квазидвумерных металлах, так как на эксперименте часто измеряются холловское сопротивление и диагональная компонента тензора магнетосопротивления. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-52-12027.

Список литературы

- [1] L. Smrcka, P. Streda, J. Phys. C: Solid State Phys., **10**, 2153 (1977).
- [2] K. Chadova, Electronic transport within the Kubo-Bastin Formalis, Ludwig-Maximilian-Universitat-Munchen (2017).
- [3] T.I. Mogilyuk, P.D. Grigoriev, Phys. Rev. B, **98**, 045118 (2018).

Резонансное туннелирование через потенциальный барьер в поле высокочастотной волны

М.В. Боев,^{1,2} В.М. Ковалёв,^{1,2} О.В. Кибис^{1,*}

¹Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск 630072, Россия

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
Новосибирск 630090, Россия

*email: oleg.kibis@nstu.ru

Туннельное прохождение частиц через потенциальные барьеры является одним из ярких явлений в физике, демонстрирующих квантовую природу частиц. Одним из полигонов для исследования туннельных явлений при низких температурах являются т.н. квантовые точечные контакты (КТК) – узкое сужение между двумя широкими электропроводящими областями, ширина которого сопоставима с дебройлевской длиной волны электронов, Рис.1(а). Одним из активно изучаемых теоретически и экспериментально направлений исследований в этой области является анализ особенностей туннелирования электронов через КТК при облучении внешним электромагнитным (ЭМ) полем. До настоящего времени исследования велись в области

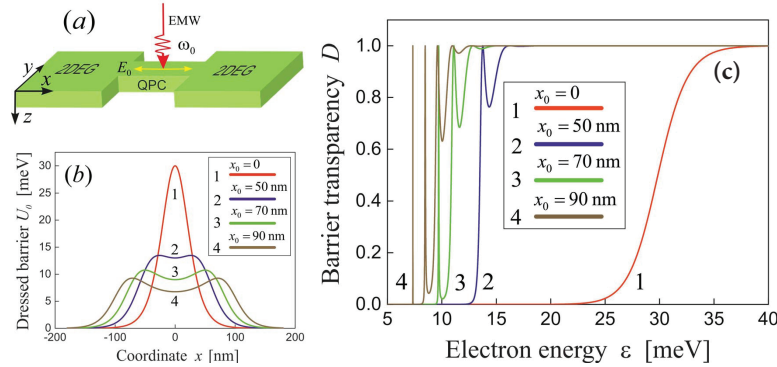


Рис. 1: (а) Квантовый точечный контакт в поле ЭМ излучения. (б) Модификация туннельного барьера осциллирующим ЭМ полем. (с) Коэффициент прохождения барьера Экарта.

низких или умеренных частот внешнего ЭМ излучения, при которых процесс туннелирования электрона через барьер сопровождается поглощением или излучением фотонов. В настоящем докладе представлена теория фотоиндуцированного туннелирования в предельном случае высоких частот ЭМ излучения для КТК, описываемого барьером Экарта $U(x) = u \cosh^{-2}(x/w)$, где u, w – высота и ширина барьера. Ключевой особенностью этой модели является отсутствие резонансов в коэффициенте прохождения барьера Экарта в отсутствие внешнего ЭМ поля. Показано, что высокочастотное поле приводит к значительной непертурбативной перенормировке самого потенциального барьера: одиночный барьер под действием линейно-поляризованного ЭМ поля преобразуется в двухбарьерную структуру, в которой могут образовываться квазистационарные состояния электронов, Рис.1 (б). В результате, процесс туннелирования становится резонансным, при этом коэффициент прохождения КТК может достигать единицы, Рис.1 (с). Для контроля получаемых результатов кроме аналитических расчетов были проведены также численные расчеты коэффициента прохождения, показывающие удовлетворительное согласие с аналитическим подходом.

Работа поддержана РНФ № 20-12-00001.

Оптическая активность скрученных метаповерхностей, обусловленная ближнепольным взаимодействием

Е.С. Вяткин,^{1,*} А.В. Пошакинский,¹ С.А. Тарасенко¹

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

*email: egor.vyatkin@bk.ru

Искусственные киральные наноструктуры активно исследуются в последние десятилетия. В нанофотонике они могут быть использованы, например, для реализации источников циркулярно поляризованного света [1]. Одним из популярных типов киральных фотонных структур являются скрученные стеки двумерных материалов, свойствами которых можно управлять, варьируя угол скручивания [2,3].

В данной работе построена теория оптической активности в системе, состоящей из двух диэлектрических слоев, расположенных на расстоянии d и повернутых друг относительно друга на угол φ . Диэлектрическая проницаемость каждого слоя предполагается периодически модулированной в форме квадратной решетки с периодом, меньшим чем длина волны света. Изолированный слой обладает изотропным оптическим откликом – при прохождении через него плоской волны ее поляризация не меняется. При сближении пары слоев они начинают взаимодействовать через свои ближние поля, представляющие собой дифрагированные эванисцентные волны, что приводит к появлению оптической активности и циркулярного дихроизма. Данные эффекты наиболее выражены при углах скручивания близких к $\pi/6$ и $\pi/3$ и дополнительно усиливаются на частотах собственных волноводных мод системы (рис. 1).

Интерференция пространственной модуляции диэлектрической проницаемости в двух слоях приводит к появлению муара. За счет рассеяния на муаре могут возникать дифрагированные на малый угол лучи, которые также обладают частичной циркулярной поляризацией. Интерференция опорного и дифрагированных лучей приводит к осцилляциям степени циркулярной поляризации света в плоскости слоев. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-72-10035.

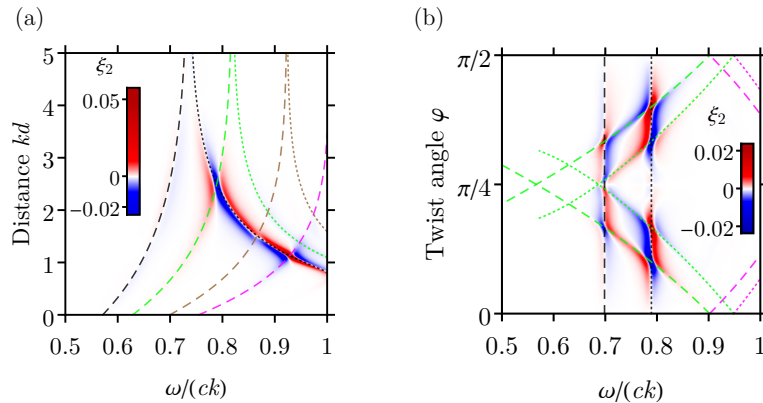


Рис. 1: Степень циркулярной поляризации прошедшего света в зависимости (а) от частоты падающего света и расстояния между слоями и (б) от частоты и угла скручивания. Линиями показаны частоты собственных волноводных мод системы.

Список литературы

- [1] S.V. Lobanov, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius *et al*, Phys. Rev. B **92**, 205309 (2015).
- [2] A.V. Poshakinskiy, D.R. Kazanov, T.V. Shubina, S.A. Tarasenko, Nanophotonics **7**, 753 (2018).
- [3] B. Lou, N. Zhao, M. Minkov *et al*, Phys. Rev. Lett. **126**, 136101 (2021).

Об устойчивости майорановских состояний в нанопроволоках с сильным локальным кулоновским взаимодействием

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

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

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

³Международная лаборатория физики конденсированного состояния,
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
Москва, Россия

*email: mshustin@yandex.ru

В последние годы активно исследуются квазиодномерные гетероструктуры типа Al-EuS-InAs, содержащие полупроводниковую нанопроволоку InAs с эпитаксиально напыленными тонкими слоями Al и EuS [1]. При низких температурах материалы Al и EuS переходят в сверхпроводящую и ферромагнитную фазы, соответственно, и в результате эффектов близости в нанопроволоке InAs наводится сверхпроводящее состояние с высокой спиновой поляризацией носителей заряда. В результате в системе возникают условия для реализации майорановских мод (ММ) [2]. Поиск таких мод осуществлялся на основе анализа дифференциальной проводимости системы. Однако к настоящему моменту отсутствует консенсус о типе квазичастичных возбуждений, ответственных за возникновение квантованного и устойчивого пика дифференциальной проводимости, наблюдаемого в эксперименте [1, 3]. Ситуацию осложняет также то обстоятельство, что для ансамбля нанопроволок InAs данные о дифференциальной проводимости при низкой концентрации носителей были успешно аппроксимированы моделью жидкости Латтинжера в режиме сильных электронных корреляций [4]. Таким образом актуальной теоретической задачей в настоящее время видится изучение свойств ММ в квантовых проволоках при совместной реализации режимов сильных электронных корреляций (СЭК) и высокой спиновой поляризации (ВСП).

В настоящей работе мы исследовали особенности затухания квазичастичных возбуждений и майорановских состояний в сверхпроводящей нанопроволоке в режиме ВСП + СЭК. Для 1D модели Шубина-Вонсовского со спин-орбитальным взаимодействием Рашба, найдена структура эффективных взаимодействий во втором порядке теории возмущений в режиме больших сильных полей и локальных кулоновских взаимодействий. Показано, что эффективная модель описывает 1D ансамбль бесспиновых фермионов с наведенными сверхпроводящими спариваниями и нелокальными взаимодействиями. Для такой системы проанализированы условия возникновения топологических фаз, а также рассчитаны характерные времена жизни квазичастиц в таких фазах. Параметры затухания квазичастиц рассчитывались как в рамках аналитического подхода, так и численно в рамках метода DMRG. В результате, было показано, что в рассматриваемом режиме ВСП+СЭК квазичастичные возбуждения, в том числе ММ, являются устойчивыми в широкой области параметров системы.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-42-04416.

Список литературы

- [1] S. Vaitiekėnas, Y. Liu, P. Krogstrup, C. M. Marcus, Nat. Phys., **17**, 43–47 (2020).
- [2] R. M. Lutchyn, J. D. Sau, and S. Das Sarma, Phys. Rev. Lett. **105**, 077001 (2010).
- [3] C. Moore, T. D. Stanescu, and S. Tewari, Phys. Rev. B **97**, 165302 (2018).
- [4] Sato et.al, Phys. Rev. B **99**, 155304 (2019).

Температурные поправки к проводимости полуметаллических квантовых ям на основе HgTe

А.В. Снегирев,^{1,2,*} В.М. Ковалёв,^{1,3} Е.Б. Ольшанецкий,¹ М.В. Энтин,¹
Н.Н.Михайлов,¹ З.Д.Квон¹

¹*Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова, СО РАН, Новосибирск
630090, Россия*

²*Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск 630090, Россия*

³*Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск 630073,
Россия*

*email: *komrad.snegirev2017@gmail.com*

Квантовые структуры на основе квантовых ям HgTe – довольно новые и интересные материалы, активно изучаемые в настоящее время. При различных величинах толщины квантовой ямы, они могут проявлять как свойства топологических изоляторов, так и двумерных полуметаллов [1, 2]. Экспериментальные исследования температурной зависимости сопротивления двумерных полуметаллов на основе широких квантовых ям HgTe при низких температурах демонстрируют квадратичное или линейное поведение сопротивления при различных значениях напряжения на затворе структуры. К настоящему моменту нет общего теоретического описания этого поведения.

В данной работе построена теория температурного поведения сопротивления двумерного полуметалла в области низких температур. В основе развиваемой теории лежит предположение, что при низких температурах основным механизмом рассеяния, определяющим температурное поведение сопротивления двумерного полуметалла, является электрон-дырочное рассеяние.

В рамках метода температурных функций Грина мы получили аналитические выражения для проводимости с учетом электрон-дырочного и примесного рассеяния. Показано, что в пределе слабого примесного рассеяния дырок температурная зависимость сопротивления является квадратичной. В случае сильного примесного рассеяния дырок температурная зависимость становится линейной. Проведено сравнение полученных температурных зависимостей с экспериментальными, которое показывает достаточно хорошее согласие между теорией и экспериментом.

Список литературы

- [1] Konig, Markus, et al., Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells, Science 318.5851 766 (2007),
- [2] Kvon, Z. D., et al., Two-dimensional semimetal in HgTe-based quantum wells, Low Temperature Physics 37, 202 (2011).

Фототоки, индуцированные пространственной неоднородностью поляризации или фазы излучения

А. А. Гуняга^{1,2,*}, М. В. Дурнев¹, С. А. Тарасенко¹

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

²СПбАУ им. Ж. И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

*email: gunalex11@gmail.com

Пространственная неоднородность структуры, например край образца с двумерным электронным газом, приводит к возникновению нелинейных эффектов второго порядка: генерации постоянных токов и токов на удвоенной частоте при возбуждении структуры электромагнитным полем [1]. Обратная ситуация — когда однородная двумерная система облучается пространственно неоднородной электромагнитной волной — также может сопровождаться генерацией локальных электрических токов. Известным примером являются токи, связанные с неоднородным нагревом электронного газа (фототермоэлектрический эффект).

В данной работе построена теория фототоков, индуцированных неоднородной электромагнитной волной. Показано, что помимо вклада, связанного с градиентом интенсивности, фототок содержит вклады, связанные с градиентом фазы электромагнитной волны и градиентами поляризационных параметров Стокса, см. рисунок. В рамках кинетической теории Больцмана получены аналитические выражения для этих вкладов в области частот, соответствующих внутризонному транспорту.

Разработанная теория применена для анализа пространственного распределения фототоков, индуцированных закрученным светом — пучком электромагнитных волн, переносящим орбитальный угловой момент [2]. В настоящее время активно решаются фундаментальные и прикладные задачи, связанные с созданием и детектированием закрученного света [3, 4]. Предложен способ измерения углового момента волны, основанный на том, что азимутальные фототоки, индуцированные закрученной волной, создают на оси пучка постоянное магнитное поле. Вычислена величина магнитного поля как функция полного углового момента и геометрических параметров пучка.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-12-00211).

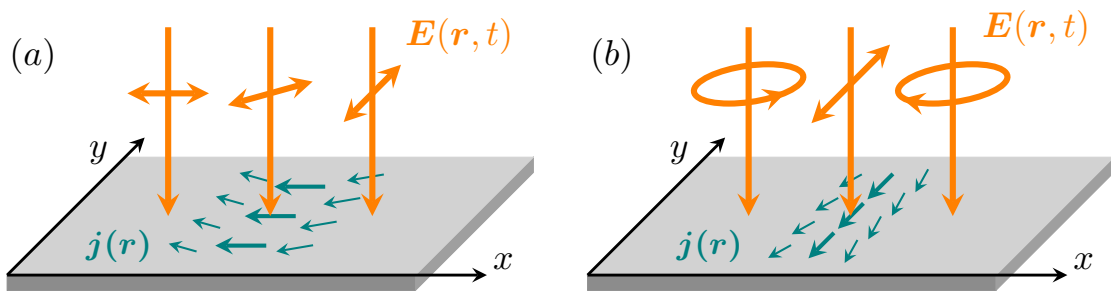


Рис. 1: Фототок $\mathbf{j}(\mathbf{r})$, генерируемый электромагнитной волной с неоднородной поляризацией, (a) при повороте плоскости линейной поляризации, (b) при переходе от правой к левой циркулярной поляризации через линейную.

Список литературы

- [1] M.V. Durnev, S.A. Tarasenko, PRB **106**, 125426 (2022); Appl. Sci. **13**, 4080 (2023).
- [2] Б.А. Князев, В.Г. Сербо, УФН **188**, 508 (2018).
- [3] Z. Ji, W. Liu, S. Krylyuk et al., Science **368**, 763 (2020).
- [4] Sh. Sederberg, F. Kong, F. Hufnagel et al., Nat. Photonics **14**, 680 (2020).

Влияние модуляции потенциала и длинноволнового беспорядка на магнитотранспорт в полупроводниковом искусственном графене

О.А. Ткаченко¹, В.А. Ткаченко^{1,2,*}, Д.Г. Бакшеев², О.П.Сушков

¹Институт физики полупроводников, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³University of New South Wales, Sydney, 2052, Australia

*email: vtkach@isp.nsc.ru

В [1,2] было предложено изучать транспорт в полупроводниковом искусственном графене, формируемом как часть мезоскопической системы в затворно-индуцированном двумерном электронном газе (ДЭГ) нелегированной структуры GaAs/AlGaAs. Периодическая модуляция потенциала создается перфорацией треугольной решетки дырочек в металлическом затворе, который управляет концентрацией электронов в ДЭГ. Второй затвор, отделенный от первого слоем диэлектрика, определяет амплитуду периодической модуляции. Такие решетки с периодом $L = 80 - 120$ нм изучаются экспериментально [3,4]. Для появления хорошо определенного дираковского конуса в минизонном спектре решетки амплитуда модуляции должна существенно превышать уровень Ферми [1,2]. Расчеты диаграмм Ванье, т.е. плотности состояний $DoS(n, B)$ в зависимости от магнитного поля B и концентрации n , с учетом коротковолнового беспорядка показывают [5], что переход от однородного ДЭГ к случаю сильной периодической модуляции происходит постепенно: веер уровней Ландау дополняется серией параллельных лучей и звездочек. На привычных ступенчатых магнитополевых зависимостях сопротивления Холла $R_{xy}(B)$ появляются пики и провалы, а при $B = 0$ наклон $R_{xy}(B)$ с ростом концентрации несколько раз меняет знак. В работе [6] показано, что *реалистический* длинноволновый беспорядок, в отличие от коротковолнового, разрушает квантовые плато R_{xy} , возникающие при низких магнитных полях $B < 0.1$ Тл за счет периодической модуляции потенциала решетки, однако тип проводимости (электронный или дырочный) сохраняется таким, как ожидалось из минизонного спектра. Из расчетов следует, что при разных L и амплитудах модуляции в диапазоне магнитных полей от нуля до 1 – 2 Тл на кривых $R_{xy}(B)$ присутствует средний наклон, который отвечает электронному типу проводимости, на фоне которого наблюдаются осцилляции с периодом B_0 , где $B_0 = h/eS$, а S — площадь элементарной ячейки треугольной решетки. Выяснено, что локальные и средние dR_{xy}/dB зависят от силы длинноволнового беспорядка, а не только от концентрации n . Работа выполнена по проекту РНФ 19-72-30023, <https://rscf.ru/project/19-72-30023/>.

Список литературы

- [1] О.А.Ткаченко, В.А.Ткаченко, Письма в ЖЭТФ **99**, 231 (2014).
- [2] О.А.Tkachenko, V.A.Tkachenko, I.S.Terekhov, O.P.Sushkov, 2D Materials, **2**, 014010 (2015).
- [3] D.Q. Wang, D. Reuter, A.D. Wieck, A.R. Hamilton, O. Klochan, Appl. Phys. Lett. **117**, 032102 (2020).
- [4] D.Q.Wang, Z.Krix, O.P.Sushkov, I.Farrer, D.A.Ritchie, A.R.Hamilton, O.Klochan, Nano Lett. (2023).
- [5] О.А.Ткаченко, В.А.Ткаченко, Д.Г.Бакшеев, О.П.Сушков, Письма в ЖЭТФ **116**, 616 (2022).
- [6] О.А.Ткаченко, В.А.Ткаченко, Д.Г.Бакшеев, О.П.Сушков, Письма в ЖЭТФ **117**, 228 (2023).

Особенности микроволнового фотокондактанса квантового точечного контакта

Н.С.Кузьмин², А.С. Ярошевич¹, З.Д. Квон^{1,2}, В.А. Ткаченко^{1,2,*},
О.А.Ткаченко¹, А.К. Бакаров¹, Е.Е. Родякина¹, А.В.Латышев^{1,2}

¹Институт физики полупроводников, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*email: vtkach@isp.nsc.ru

Недавно проведено экспериментальное и численное исследование микроволнового фотокондактанса (ФК) короткого (100 нм) квантового точечного контакта (КТК) в туннельном [1] и открытом [2] режимах при разных частотах облучения около 10^3 , 10^2 ГГц [1] и $f \approx 2$ ГГц [2]. Здесь сообщается о детальном экспериментальном исследовании последнего случая, как принципиально простого, поскольку время пролета электрона через КТК $\tau \ll 1/f$. Установлено, что при таком f поведение КТК характеризуется целым рядом особенностей (смена знака ФК при переходе от туннельного к открытому режиму, появление ступенчатой структуры ФК и различная ширина области гигантского ФК), возникновение которых определяется конкретной реализацией электростатического потенциала, зависящей как от технологически заданной структуры с двумерным электронным газом (ДЭГ), так и от процедур охлаждения образца. Наиболее интересны различия в отклике образцов на СВЧ-облучение, которые обнаружены в случае близких основных параметров ДЭГ в гетероструктурах GaAs/AlGaAs трех типов: (1)–обыкновенный гетеропереход; (2)–гетеропереход с заменой AlGaAs на короткопериодную сверхрешетку (СР) GaAs/AlAs с Si- δ -легированием одного из тонких слоев GaAs в СР; (3)–квантовая яма типичной ширины (12.5 нм) в окружении таких же СР, как в (2).

При температуре 4.2К обнаружена положительная фотопроводимость ДЭГ в случаях (1), (2), но отрицательная в (3), хотя отклик темновой проводимости ДЭГ на обычный нагрев образца в этих случаях демонстрировал металлический тип проводимости.

В случае (1) точка смены положительного на отрицательный фотокондактанс КТК стабильно находилась в туннельном режиме, а в (2) и (3) она смещалась в открытый режим и не имела стабильного положения.

В случаях (2) и (3) переход по затворному напряжению V_g из открытого в глубокий туннельный режим КТК занимал более широкий промежуток ΔV_g , чем в (1).

Темновой туннельный кондактанс КТК в случае (1) пропорционален $\exp(V_g/\Delta V_g)$ [2]. Однако, в случаях (2), (3) в туннельном и открытом режимах наблюдаются чувствительные к процедурам охлаждения особенности кондактанса, а фотоотклик туннельного кондактанса гигантски увеличивался не только с постепенным ростом отталкивающего V_g и интенсивности облучения [1,2], но также резкими ступенями на обнаруженных особенностях по V_g . Обнаруженные по поведению ДЭГ и КТК различия гетероструктур связаны с низкой энергией активации примесей в δ -легированных слоях GaAs в СР GaAs/AlAs.

Работа выполнена по гранту РНФ 23-72-30003, <https://rscf.ru/project/23-72-30003/>.

Список литературы

[1] В.А.Ткаченко, З.Д.Квон, О.А.Ткаченко, А.С.Ярошевич, Е.Е.Родякина, Д.Г.Бакшеев, А.В.Латышев, Письма в ЖЭТФ **113**, 328 (2021).

[2] В.А.Ткаченко, А.С.Ярошевич, З. Д.Квон, О.А.Ткаченко, Е.Е.Родякина, А.В.Латышев, Письма в ЖЭТФ **114**, 108 (2021).

Влияние деформации на тонкую структуру энергетического спектра ферми-поляронов в двумерных полупроводниках

З.А. Яковлев,^{1,*} М.М. Глазов¹

¹ ФТИ и.м. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург

*email: iakovlev.zakhar@gmail.com

Сильное кулоновское взаимодействие в двумерных полупроводниках на основе дихалькогенидов переходных металлов открывает широкие возможности по исследованию экситонных эффектов. Особый интерес представляют кулоновские комплексы, возникающие при взаимодействии экситонов с резидентными носителями заряда. Имеется два подхода к теоретическому описанию такой ситуации. Первый из них основывается на анализе спектра и оптических свойств трехчастичных комплексов – трионов. Другой состоит в учете взаимодействия экситона со всем ферми-морем носителей заряда, описываемого в рамках ферми-поляронов. Для широкого круга эффектов эти подходы оказываются по существу эквивалентными [1].

В работе представлена ситуация, где трионный и ферми-поляронный подходы дают качественно разные результаты. Изучена тонкая структура кулоновских комплексов при наличии анизотропных деформаций. Компоненты тензора деформаций инвариантны по отношению к инверсии времени, поэтому трионы, обладающие полужелым спином, не расщепляются. Напротив, ферми-поляроны – четырехчастичные состояния из триона и коррелированной с ним дырки в море Ферми [2] обладают бозе-статистикой и испытывают линейное анизотропное расщепление. Симметричный анализ подтверждается микроскопическим расчетом методом матриц рассеяния.

На рис. 1 представлены спектры поглощения линейно поляризованного света в области трионных резонансов в деформированном монослое WSe₂ в зависимости от концентрации резидентных электронов. Определены энергии, силы осциллятора и анизотропные расщепления радиационных дублетов ферми-поляронов. Показано, что расщепление пропорционально как энергии Ферми, так и величине деформации. Развита теория описывает недавний эксперимент [3].

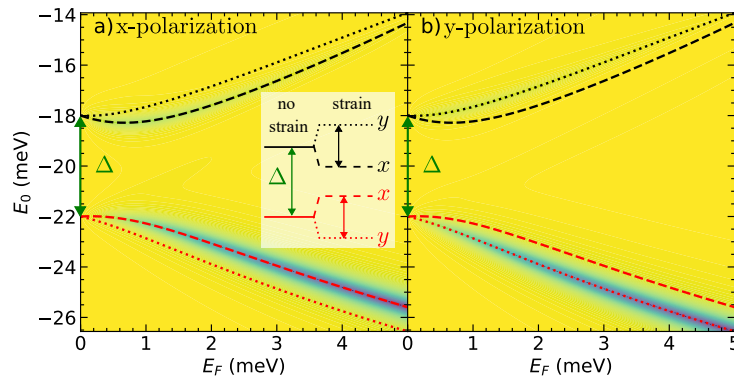


Рис. 1: Спектр поглощения а) x - и б) y -поляризованного света в монослое WSe₂ в зависимости от энергии Ферми. Красные и черные линии показывают энергии внутри- и междолинного дублетов ферми-поляронов, соответственно. Вставка – схема тонкой структуры.

Список литературы

- [1] M.M. Glazov, J. Chem. Phys. **153**, 034703 (2020).
- [2] R.A. Suris, et al., physica status solidi (b) **227**, 343 (2001).
- [3] J. Jasinski, et al., 2D Materials **9**, 045006 (2022).

Обобщённые граничные условия для огибающих волновых функций электрона на высоком потенциальном барьере.

К.И. Русских,^{1,2,*} А.В. Родина²

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, г. Санкт-Петербург, Россия

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

*email: kirill.russkih99@gmail.com

Применение метода эффективной массы для наноструктур с резкими границами предполагает формулировку граничных условий (ГУ) для огибающих волновых функций (в.ф.), обеспечивающих самосопряженность Гамильтониана [1]. В работе изучены энергии E_l и радиальные в.ф. R_l электрона с орбитальным моментом $l = 0, 1, 2$ в сферических полупроводниковых нанокристаллах (НК) радиуса a , окруженных средой с высоким потенциальным барьером U . Стандартные ГУ $R_l(a) = 0$ в модели $U \rightarrow \infty$ [2] не позволяют учесть влияние поверхности НК и разницу эффективных масс электрона m_A и m_B внутри и снаружи НК. Рассмотрено два типа ГУ: (i) стандартные ГУ для конечного барьера (СГУ)

$$R_l^A(r) |_{r=a} = R_l^B(r) |_{r=a}, \quad \frac{1}{m_A} \frac{dR_l^A}{dr} |_{r=a} = \frac{1}{m_B} \frac{dR_l^B}{dr} |_{r=a},$$

и (ii) обобщённые ГУ для бесконечного барьера (ОГУ)

$$R_l^A(r) |_{r=a} = -\frac{A}{\mu} \frac{dR_l^A}{dr} |_{r=a}, \quad R_l^B(r > a) = 0.$$

Здесь $\mu = m_A/m_B$, A – параметр, имеющий размерность длины и не зависящий от a и l [2]. Для в.ф. $R_l(r)$, найденных при помощи СГУ для заданных $l = 0, 1, 2$, $\mu \leq 1$ и U/E_q (где $E_q = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_A a^2}$), определены значения параметра ОГУ $A = A_l$, позволяющие получить такие же энергии E_l/E_q . Обнаружено, что $A_l/a \approx A/a = B/a$ с точностью 2 % для всех l и μ при $B/a = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m_B a^2 U}} < 0.1$ (рис. 1(а)), что определяет область применимости ОГУ с параметром $A = B$. Рассчитанные с ОГУ и СГУ энергии при $U/E_q = 20$ хорошо совпадают для всех $\mu \leq 1$, а их отклонение от энергий для $U \rightarrow \infty$ растет с уменьшением μ (рис. 1(б)).

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-12-00300.

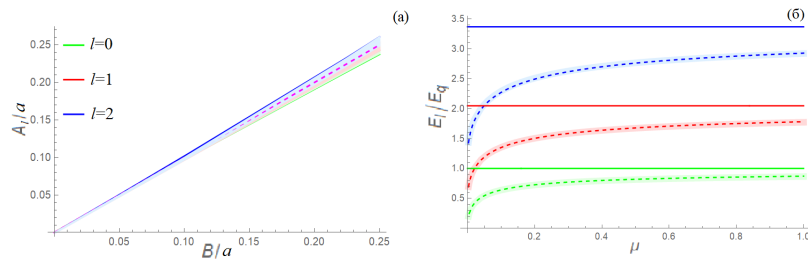


Рис. 1: (а) Зависимость безразмерного параметра ОГУ $A/a = A_l/a$ от B/a для $l = 0, 1, 2$. (б) Зависимость энергий E_l/E_q от μ для СГУ (штриховые линии), ОГУ (бледные сплошные линии) и $U \rightarrow \infty$ (горизонтальные сплошные линии).

Список литературы

- [1] A. Rodina et al., Phys. Rev. B **65**, 125302 (2002).
- [2] Ал.Л. Эфрос, А.Л. Эфрос, ФТП **40**, 337 (1982).

Транспортные свойства металлических антиферромагнетиков

Д. Л. Воробьев,^{1,2,*} В. А. Зюзин¹

¹Институт Теоретической Физики им. Л. Д. Ландау, Черноголовка, Россия

²НИУ Высшая Школа Экономики, Москва, Россия

*E-mail: dlvorobev@edu.hse.ru

Эффект спин-импульсного зацепления электронов в твёрдых телах изучается относительно давно и представляет интерес и по нынешний день. Например, хорошо изучено спин-орбитальное взаимодействие Рашбы-Дрессельхауза. В этой работе мы рассматриваем другой вариант спин-импульсного зацепления, возникающего в антиферромагнетиках [1], и описываемый таким Гамильтонианом,

$$\hat{H}_{\text{AFM}} = \beta \sigma_z k_x k_y, \quad (1)$$

где β константа, σ_z - спиновая матрица Паули, $k_{x/y}$ - операторы импульса. Хотя и предложено оно было в 1964, но только относительно недавно были сформулированы условия на магнитные и пространственные группы симметрий, при которых возможно появление зацепления. Различные формализмы и классификации были предложены [2, 3, 4] с конкретными предсказаниями искомых материалов. Некоторые результаты были подтверждены DFT вычислениями.

В этой работе мы исследуем возможные магнетотранспортные свойства таких металлических антиферромагнетиков. В частности, мы предсказываем линейную по магнитному полю проводимость

$$\mathbf{j}_{\text{LMC}} \propto \tau \beta B_z (E_x \mathbf{e}_y + E_y \mathbf{e}_x), \quad (2)$$

и аномальный эффект Холла, квадратичный по внешнему магнитному полю, направленному в плоскости проводимости,

$$\mathbf{j}_{\text{ANE}} \propto \beta B_x B_y [\mathbf{E} \times \mathbf{e}_z], \quad (3)$$

где $\mathbf{E}$ - электрическое поле, $\mathbf{B}$ - магнитное, а τ - время рассеяния на примесях. Наше исследование представляет возможность для экспериментального подтверждения теории исследуемых материалов.

Список литературы

- [1] S. Pekar and E. Rashba, “Combined resonance in crystals in inhomogeneous magnetic fields,” *Zh. Eksperim. i Teor. Fiz.*, vol. 47, 1964.
- [2] S. Hayami, Y. Yanagi, and H. Kusunose, “Bottom-up design of spin-split and reshaped electronic band structures in antiferromagnets without spin-orbit coupling: Procedure on the basis of augmented multipoles,” *Phys. Rev. B*, vol. 102, p. 144441, Oct 2020.
- [3] L.-D. Yuan, Z. Wang, J.-W. Luo, E. I. Rashba, and A. Zunger, “Giant momentum-dependent spin splitting in centrosymmetric low- z antiferromagnets,” *Phys. Rev. B*, vol. 102, p. 014422, Jul 2020.
- [4] L. Šmejkal, J. Sinova, and T. Jungwirth, “Beyond conventional ferromagnetism and antiferromagnetism: A phase with nonrelativistic spin and crystal rotation symmetry,” *Phys. Rev. X*, vol. 12, p. 031042, Sep 2022.

Фотоиндуцированный эффект Фарадея в двумерном электронном газе

М.В. Дурнев,^{1,*}

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

*email: durnev@mail.ioffe.ru

Метод накачка-зондирование широко используется для исследования динамики намагниченности в объёмных кристаллах и низкоразмерных системах [1]. Намагниченность, создаваемая циркулярно поляризованной накачкой, может быть связана как со спиновой поляризацией электронов и дырок, так и с орбитальными токами – так называемый обратный эффект Фарадея [2, 3]. Орбитальный магнитный момент, возникающий в двумерной проводящей системе под действием накачки, создаёт магнитное поле, однако величина этого поля слишком мала, чтобы привести к заметному вращению плоскости поляризации пробного луча, поэтому представляет интерес исследование других механизмов вращения.

В работе построена кинетическая теория эффектов Фарадея и Керра, индуцированных циркулярно поляризованным электрическим полем в двумерном электронном газе, Рис. 1(а). В рамках кинетического уравнения рассчитаны углы поворота плоскости поляризации зондирующего поля при отражении и прохождении через слой, а также наведенная эллиптичность. Ответы получены в широком диапазоне по величине $\omega\tau_1$, где ω – частота пробного поля, а τ_1 – время релаксации импульса. Построенная теория применима в случае параболической и линейной энергетической дисперсии двумерных электронов и произвольного типа рассеивателей. Показано, что при совпадающих частотах полей накачки и зондирования в углах поворота и эллиптичности возникают резонансные особенности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-00047).

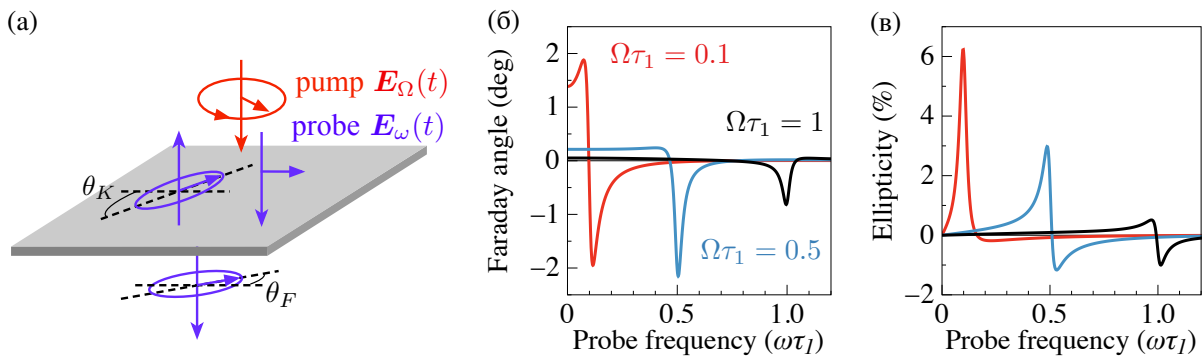


Рис. 1: (а) Схематичное изображение фотоиндуцированного эффекта Фарадея и Керра в двумерном электронном газе. Зависимости угла фарадеевского вращения (б) и эллиптичности (в) от частоты зондирующего поля ω для различных частот поля накачки Ω . Зависимости рассчитаны для электронного газа с концентрацией $n_e = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ в двуслойном графене, освещаемом терагерцовым излучением с интенсивностью $I = 10 \text{ Вт/см}^2$.

Список литературы

- [1] М. М. Глазов, ФТТ **54**, 3 (2012).
- [2] R. Hertel, J. Magn. Magn. Mater. **303**, L1 (2006).
- [3] S. V. Mironov et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 137002 (2021).

Размерное квантование и спиновые расщепления дырок в GaAs нанопроводах

И.А. Кокурин^{1,2,*}

¹ Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

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

*email: kokurinia@mail.ru

Полупроводниковые нанопровода (НП) группы $A^{III}B^V$ с решеткой цинковой обманки растут, как правило, вдоль направления $[111]$, вследствие чего имеют гексагональное поперечное сечение. Очевидно, что информация о структуре подзонного спектра носителей в НП принципиальна для приложений. Для электронов зоны проводимости в НП $A^{III}B^V$ подзонный спектр достаточно хорошо изучен, включая спиновые расщепления подзон. Для дырок ситуация несколько сложнее. В настоящий момент имеется ряд работ, в которых в рамках $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ -метода изучены и дырочные состояния в НП. Тем не менее, имеющиеся расчеты пренебрегают одним (или более) из следующих моментов: правильная форма сечения (часто расчеты ведутся для НП кругового сечения), правильная ориентация (часто изучаются $[001]$ -ориентированные НП, или же вовсе используется сферическое приближение), отсутствие центра инверсии у решетки материала НП. Работы, принимающие во внимание последний пункт нам не известны, хотя очевидно, что спиновые эффекты для дырок проявляются в большей степени чем для электронов.

Для расчета дырочных состояний в GaAs НП гексагонального сечения мы обобщили подход, ранее использованный при расчете подзонного спектра для электронов изотропной зоны [1]. Такой подход позволяет записать гамильтониан Латтинжера 4×4 используя смешанный базис (блоховских и огибающих функций) и численно диагонализировать его. Учет отсутствия у решетки цинковой обманки центра инверсии приводит к необходимости включения в полный гамильтониан одного линейного по квазиимпульсу k и 4-х пропорциональных k^3 слагаемых [2]. Полный гамильтониан НП в этом случае оказывается неэрмитовым. В нашем подходе, данная проблема легко устраняется симметризацией полученного матричного гамильтониана. Такой подход не является строгим. Его обоснованием может служить аналогичный расчет, опирающийся на 14-зонный гамильтониан, полностью воспроизводящий T_d симметрию кристаллической решетки.

Численный расчет приводит, в согласии с симметричным рассмотрением, к наличию спиновых расщеплений не у всех дырочных подзон. Изучено распределение дырочной плотности в подзонах: построены соответствующие карты. Показано, что учет T_d симметрии материала НП, и связанных с этим дополнительных членов в эффективном гамильтониане зоны Γ_8 является принципиальным. Также изучен эффект Рашбы в поперечном электрическом поле. В умеренном поле с напряженностью 10^4 В/см для дырок GaAs НП спиновые расщепления нескольких первых подзон оказываются на порядок больше, чем расщепления, связанные с отсутствием центра инверсии кристаллической решетки (эффект Дрессельхауза).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 22-12-00139).

Список литературы

- [1] I. A. Kokurin, *Semiconductors* **54**, 1897 (2020).
- [2] R. Winkler, *Spin-Orbit Coupling in Two-Dimensional Electron and Hole Systems*. (Springer, Berlin, 2003).

Фотогенерация спин-поляризованных носителей в графене на магнитной подложке

К.С. Денисов, К.Ю. Голеницкий, И.В. Рожанский

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

**email: denisokonstantin@gmail.com*

Различные физические явления в атомарно-тонких слоях двумерных материалов, таких как графен, могут быть очень чувствительны к их материальному окружению. Эффекты близости (proximity effects) начинают играть важную роль для двумерных материалов, наделяя их новыми свойствами. Таким образом, подбирая нужное окружение для двумерного материала, можно управлять его свойствами [1].

В работе теоретически исследованы оптически индуцируемые спиновые явления в структурах на основе монослоя графена, лежащего на подложке, являющейся магнитным изолятором. Ключевая особенность исследуемой структуры — значительный эффект магнитной близости. Он приводит к изменению спектра носителей заряда в графене и к формированию равновесной спиновой поляризации электронного газа в двумерном слое. Более того, понижение симметрии на интерфейсе способствует усилению эффектов спин-орбитального взаимодействия и может приводить к появлению новых, зависящих от спина электрона слагаемых в гамильтониане, не представленных в системах с параболическим спектром. В работе исследованы особенности фотогенерации спиновой поляризации носителей заряда в графене электрическим полем падающей волны при наличии интерфейсного спин-орбитального взаимодействия. Теоретически рассмотрены микроскопические механизмы, ответственные за оптически индуцируемые переходы с переворотом спина, которые приводят к спиновой поляризации возбуждённых носителей. Установлено, что спиновый резонанс в данном классе структур имеет несколько интересных особенностей, связанных именно с изменением энергетического спектра и симметрией интерфейсного спин-орбитального взаимодействия. Продемонстрировано, что эффект магнитной близости может привести к существенному усилению эффективности фотогенерации спин-поляризованных носителей заряда в графене в терагерцовом и дальнем инфракрасном диапазоне длин волн. В рамках феноменологической теории среднего поля получен коэффициент поглощения света в графене с учётом переходов с переворотом спина электрона. Также были проанализированы оптические свойства гетероструктур на основе графена с магнитной подложкой, отвечающие процессу генерации спин-поляризованных носителей при поглощении падающего излучения. Теоретическая оценка величины неравновесной спиновой поляризации электронов, возникающей при межзонном поглощении света, составляет $\sim 10\%$ для реалистичных величин эффекта магнитной близости в графене.

Работа выполнена в рамках проекта № 22-22-20082 (соглашение РНФ № 22-22-20082 от 25.03.2022, соглашение о предоставлении регионального гранта № 23/2022 от 14.04.2022)

Список литературы

- [1] I. Žutić, et al, Materials Today **22**, 87 (2019).

Плазменные колебания в полосе с двумерным электронным газом, сильно экранированным металлическим затвором.

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

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

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

*email: rodionov.da@phystech.edu

Двумерные (2D) плазменные колебания или плазмоны в недавнее время стали исследоваться в электронных системах (ЭС), размеры которых сопоставимы или больше длины волны возбуждающего излучения. В таких системах становится существенна роль электромагнитного запаздывания, которая влияет на величину циклотронного резонанса [1] и может приводить к уменьшению затухания плазменных колебаний [2]. Одна из простейших ограниченных 2D ЭС – полоса. Изучению плазмонов в ней и посвящена наша работа.

Исследуются собственные плазменные колебания в 2D ЭС в форме бесконечной полосы конечной ширины при наличии постоянного однородного внешнего магнитного поля. На расстоянии d под 2D ЭС располагается металлический затвор. Проводимость электронного газа в 2D ЭС описывается моделью Друде. Используя уравнения Максвелла, сначала была получена интегро-дифференциальная связь плотности тока с индуцированным им электрическим полем, учитывая, что его тангенциальные компоненты должны быть равны нулю на металлическом затворе. Возмущение плотности заряда, плотность тока и индуцированные ими электромагнитные поля считались пропорциональными $e^{-i\omega t}$, где ω – комплексная частота, мнимая часть которой описывает затухание. Затем при помощи локального закона Ома уравнение замыкалось на плотность тока. Полученное уравнение анализировалось в пределе малых d (много меньших всех характерных размеров в системе), в котором оно становится чисто дифференциальным, что позволяет решить задачу аналитически. Такой предел соответствует локальному взаимодействию электронов 2D ЭС с их изображением в металле [3].

Оказалось, что частота краевого магнитоплазмона не зависит от магнитного поля. Для остальных мод, как и в квазистатике, затухание (мнимая часть частоты) в сильном магнитном поле оказывается в два раза больше, чем в его отсутствии, однако сами значения меньше. Для всех плазмонов затухание определяется столкновительным вкладом, т.к. в пределе локального взаимодействия излучение 2D ЭС подавляется излучением зарядов изображения в металле.

Так же в работе рассмотрен случай анизотропной 2D ЭС, для электронов которой поверхность Ферми является эллипсом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ №21-12-00287.

Список литературы

- [1] N.D. Semenov, V.M. Muravev, I.V. Andreev, and I.V. Kukushkin, JETP Lett. **114**, 616 (2021).
- [2] P.A. Gusikhin, V.M. Muravev, A.A. Zagitova, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett. **121**, 176804 (2018).
- [3] I.V. Zagorodnev, A.A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, and V.A. Volkov, Nanomaterials **13**, 975 (2023).

Экситоны в реконструированных муаровых гетероструктурах

A.C. Баймуратов,^{1,*} S. Zhao,¹ Z. Li,¹ X. Huang,¹ A. Rupp,¹ J. Göser,¹
I.A. Vovk,² S.Yu. Kruchinin,³ K. Watanabe,⁴ T. Taniguchi,⁵ I. Bilgin,¹
A. Högele¹

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

²*PhysNano Department, ITMO University, Saint Petersburg, Russia*

³*Center for Computational Materials Sciences, Faculty of Physics, University of Vienna,
Vienna, Austria*

⁴*Research Center for Functional Materials, National Institute for Materials Science,
Tsukuba, Japan*

⁵*International Center for Materials Nanoarchitectonics, National Institute for Materials
Science, Tsukuba, Japan*

*email: anvar.baimuratov@lmu.de

Рациональный дизайн муаровой гетероструктуры на основе двух слоев дихалькогенидов переходных металлов [1] позволяет контролировать экситонные свойства в данной структуре. В дополнение к несоответствию постоянных решеток в слоях или относительному повороту слоев, реконструкция решетки в таких материалах также изменяет эти свойства. В данной работе мы изучаем мезоскопическую картину реконструкции, которую можно понять, объединив визуализацию сканирующей электронной микроскопии и моделирование полей смещения решетки. Корреляция оптического отклика с наблюдаемыми паттернами реконструкции позволяет создать карту экситонных особенностей в реконструированных гетероструктурах. Управление реконструкцией открывает путь к пространственной настройке экситонного ландшафта в квантовых оптоэлектронных устройствах [2].

Список литературы

- [1] G. Wang, A. Chernikov, M.M. Glazov, T.F. Heinz, X. Marie, T. Amand, B. Urbaszek, *Rev. Mod. Phys.* **90**, 021001 (2018)
- [2] S. Zhao, Z. Li, X. Huang, A. Rupp, J. Göser, I.A. Vovk, S.Yu. Kruchinin, K. Watanabe, T. Taniguchi, I. Bilgin, A.S. Baimuratov, A. Högele, *Nat. Nanotechnol.* **18**, (2023).