

194021, г. Санкт-Петербург,  
Политехническая ул., 26  
ФГБУН Физико-Технический Институт им. А. Ф. Иоффе  
Российской Академии Наук  
Диссертационный совет Д002.205.02

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

*на диссертацию* Будкина Григория Владимировича “ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И НЕЛИНЕЙНЫЙ ТРАНСПОРТ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ”, *представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук* (специальность 01.04.02 - теоретическая физика).

**Актуальность.** Исследование фотогальванических эффектов в полупроводниках является традиционной тематикой для Физико-Технического Института им. А.Ф. Иоффе. В последние 10 лет в физике происходит бурное развитие, связанное с появлением новых интересных двумерных и трёхмерных материалов, в том числе двумерных и трёхмерных топологических изоляторов. Изучение фотогальванических эффектов в этих новых материалах представляет актуальную теоретическую и экспериментальную задачу. Теоретические исследования фотогальванических эффектов в этих новых материалах можно проводить хорошо отработанными методами из теории полупроводников. В диссертации представлены результаты теоретического анализа ряда фундаментальных задач, относящихся к описанию фотогальванических эффектов в квантовых ямах и топологических изоляторах. В первой главе диссертации представлен теоретический анализ фотогальванических эффектов в асимметричных квантовых ямах в классически слабом магнитном поле. Показано, что в условиях циклотронного резонанса амплитуда фототока резонансно усиливается. Во второй главе изучаются фотогальванические эффекты на поверхности трёхмерных топологических изоляторов. В отличие от первой главы, где фототок связан с анизотропным упругим рассеянием, пропорциональным перпендикулярной компоненте переменного электрического поля, здесь фототок возникает из-за асимметрии упругого рассеяния, пропорционального внешнему магнитному полю. В третьей главе диссертации изучается эффект увлечения в двумерных электронных системах, связанный с передачей импульса от фотонов к носителям заряда. Построена теория для двух механизмов генерации фототока: из-за динамического эффекта Холла и из-за пространственных колебаний электрического поля. Проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными для квантовых ям на

основе InSb. В четвертой главе изучены спиновые и электрические фототоки в низкосимметричных квантовых ямах сильным спин-орбитальным взаимодействием, обусловленные асимметричным спин-зависимым рассеянием на фононах. Проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученных в структурах на основе HgTe. В пятой главе построена теория магнитного орбитального храповика в двумерных электронных системах с пространственно-осциллирующим магнитным полем.

**Новизна и достоверность.** В диссертационной работе впервые получен ряд принципиально важных новых результатов, имеющих фундаментальное значение. Наиболее интересные из них следующие. Во-первых, построена микроскопическая теория фотогальванических эффектов и эффекта увлечения электронов фотонами в низкосимметричных квантовых ямах во внешнем магнитном поле. Обнаружено усиление фототока в условиях циклотронного резонанса. Во-вторых, теоретически исследованы магнитоиндуцированные фотогальванические эффекты в квантовых ямах HgTe с критической толщиной (при которой объемный спектр становится дираковским), обусловленные спин-зависимым электрон-фононным рассеянием. В третьих, построена теория магнитного храповика в структурах с пространственно осциллирующим магнитным полем.

**Научная и практическая значимость** Научная значимость диссертации состоит в ряде новых фундаментальных результатов, полученных впервые. Наиболее интересны два из результатов диссертации: предсказание усиления фототоков в двумерных системах в условиях циклотронного резонанса и построение теории магнитного орбитального храповика в двумерных электронных системах с пространственно-осциллирующим магнитным полем.

Исходя из вышесказанного, можно с уверенностью сказать, что научная и практическая значимость всех результатов диссертации высока и несомненна.

Развитые в диссертации оригинальные теоретические методы и подходы могут быть использованы для количественного описания разнообразных фотогальванических явлений в топологических изоляторах и двумерных электронных системах. Результаты диссертации Г.В. Будкина могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области физики полупроводников и физики конденсированных сред (ИРЭ РАН, ИС РАН, НЦ КИ ПИЯФ, МГУ, ИФП СО РАН, ФИАН, ИФТТ РАН, ИТФ РАН, и др.).

Диссертация Г.В. Будкина написана понятным языком и содержит достаточное количество иллюстраций. В ней четко сформулированы цели исследования, достаточно полно описаны и проанализированы использованные теоретические методы и обсуждены полученные результаты.

Замечания. По диссертации следует высказать несколько вопросов и замечаний, не имеющих принципиального характера:

- В главе 1 теория линейного и циркулярного фотогальванического эффекта развивается для классически слабых магнитных полей. В этом случае, не является ли превышением точности удерживание вкладов  $(\omega_{ct})^2$  в знаменателях первых дробей в формулах (1.16)? Нельзя ли вблизи циклотронного резонанса выразить коэффициенты  $L_{1,2}$  и  $S_{1,2}$  через проводимость и дать качественный вывод формул (1.16), не опирающийся на кинетическое уравнение?
- Было бы полезно сравнить амплитуды величин фототока, вычисленного в главе 1 (из-за асимметрии) и в главе 3 (из-за увлечения).
- В главе 5 рассматривается генерация поляризационно зависимых токов, линейных по электрическому полю и модулированному магнитному полю. Будут ли в этих токах усиление около циклотронного резонанса, если кроме малой модулированной компоненты у магнитного поля будет еще постоянная составляющая?
- Было бы полезно, хотя бы на качественном уровне обсудить, что можно ожидать в ситуации циклотронного резонанса в режиме сильных магнитных полей, когда уровни Ландау хорошо разделены.

Эти замечания не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне.

Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах в отечественных (Письма в ЖЭТФ) и зарубежных журналах (Phys. Rev. B), доложены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Г.В. Будкина является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение новой научной задачи об описании фотогальванических эффектов в двумерных электронных системах и топологических изоляторах в условиях

циклотронного резонанса. Решение этой задачи является важным этапом в развитии современной теоретической физики. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Г.В. Будкин безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.02 - теоретическая физика**.

доктор физико-математических наук,  
специальность 01.04.02 - теоретическая физика  
старший научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау  
Российской академии наук  
Бурмистров Игорь Сергеевич  
1 сентября 2017 г.  
142432, Московская обл., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А  
тел. 8 495 7029317, e-mail: burmi@itp.ac.ru

Подпись И.С. Бурмистрова заве  
ученый секретарь  
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
к.х.н. С.А. Крашаков