

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Дурнева Михаила Васильевича “Электронные состояния и нелинейный транспорт в двумерных дираковских материалах”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников

Работа посвящена изучению ряда нелинейных фотоэлектрических явлений в дираковских материалах. Большой интерес к этой тематике обусловлен надеждой на качественный скачок в современной нанoeлектронике за счёт создания нового поколения полупроводниковых приборов на основе графена и топологических изоляторов. Такие материалы обладают уникальными свойствами, одним из которых является топологическая защита. В частности, на границе топологического изолятора существуют идеально проводящие топологически защищённые дираковские состояния, которые нечувствительны к обычному (немагнитному) беспорядку. Кроме того, современная технология позволяет создавать дираковские материалы с различными электронными свойствами, в том числе, обычные и топологические изоляторы, а также полуметаллы и узкозонные полупроводники. Несмотря на огромный интерес к дираковским материалам, их нелинейные фотоэлектрические свойства изучены недостаточно. Поэтому диссертационная работа Михаила Васильевича Дурнева, посвященная подробному теоретическому анализу целого ряда новых нелинейных транспортных и оптических эффектов в структурах на основе дираковских материалов, с акцентом на анализ краевых и поляризационно-зависимых явлений, а также с учётом симметрии кристаллической решетки, написана как нельзя вовремя и **актуальность** темы диссертации несомненна.

В работе получен целый ряд новых результатов, определяющих её **принципиальную научную новизну**. В частности, изучен спектр дираковских состояний в квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ вблизи топологического перехода, предсказана сильная анизотропия эффекта Зеемана для краевых состояний двумерного топологического изолятора, показано, что отсутствие центра инверсии приводит к прямым оптическим переходам в квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ в рамках электрического дипольного приближения, развита теория циркулярного фотогальванического эффекта для краевых состояний двумерного топологического изолятора и обычной двумерной системы в режиме квантового эффекта Холла, проведён подробный анализ экспериментов по циркулярному краевому фотогальваническому эффекту, а также предсказан циклотронный резонанс в краевом токе. Помимо этого, изучена генерация второй гармоники и плазмонных возбуждений в краевом токе и построена теория фотоиндуцированных эффектов Холла и Фарадея.

Один из наиболее интересных результатов работы, на мой взгляд, состоит в предсказании возникновения «синтетического» магнитного поля в двумерных системах под действием циркулярно поляризованного излучения терагерцового диапазона. Этот результат может объяснить недавние эксперименты по оптическому возбуждению массива графеновых дисков сильной терагерцовой волной, в которых наблюдалось вращение плоскости поляризации дополнительной пробной волны, соответствующее весьма большим магнитным полям (около 0.6 Тесла).

Таким образом, в работе развита достаточно общая теория нелинейного фототранспорта в дираковских материалах, предсказания которой позволили объяснить ряд экспериментов. Все результаты, полученные в диссертационной работе, являются оригинальными. **Практическая значимость** работы также несомненна, так как большинство систем, изученных в работе, топологически защищены, т.е. устойчивы к возмущениям обычными дефектами и шумами, и, как следствие, весьма перспективны для использования в квантовых приборах оптоэлектроники.

В качестве мелкого замечания, следует отметить, что в автореферате никак не обсуждается роль электрон-электронных столкновений, которые могут играть существенную роль в достаточно чистых системах, важных для практических приложений. В частности, было бы интересно повторить все вычисления для гидродинамического режима, в котором столкновения доминируют. Также в автореферате при анализе фотоиндуцированных краевых токов предполагается, что краевое состояние является бесконечным. В то же время, в реальных системах конечного размера, появляется дополнительная возможность передачи импульса и возникают новые внутризонные переходы, приводящие к генерации постоянного тока. Как следствие, возникает обратный эффект Фарадея, который может конкурировать с механизмом генерации «синтетического» магнитного поля, обсуждаемым в автореферате. Сделанные замечания не являются критическими и скорее являются пожеланием для дальнейшего развития полученных результатов. Они никак не влияют на общую высокую оценку работы, выполненной на самом высоком уровне.

Подводя итог, следует сказать, что, насколько можно судить по автореферату, диссертация Дурнева Михаила Васильевича является законченной научной работой, выполненной на очень высоком научном уровне, и содержит решение ряда важных задач о нелинейном оптическом отклике дираковских материалов на основе топологических изоляторов, графена и близких материалов. Материалы диссертации опубликованы в ведущих зарубежных журналах (Physical Review Letters, 2D Materials, Успехи физических наук, Physical Review B, Journal of Physics: Condensed Matter, Physica status solidi, Applied Sciences и др.), докладывались автором на престижных российских и международных научных конференциях. Автореферат написан подробно и понятно и дает полное представление о содержании диссертации. Положения, выносимые на защиту, хорошо обоснованы.

Таким образом, насколько можно судить по автореферату, диссертационная работа содержит принципиально новые важные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Она удовлетворяет всем требованиям диссертационных советов Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, предъявляемым к докторским диссертациям. Дурнев Михаил Васильевич безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников

24 февраля 2025 г.

Качоровский Валентин Юрьевич, доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник сектора теории оптических и электрических
явлений в полупроводниках,

ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
Телефон: +7-921-9941081
e-mail: kachor.valentin@gmail.com

Подпись В.Ю. Качоровского заверяю