

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Прудкогляда Валерия Андреевича «Свойства электронного транспорта в топологических материалах на основе HgTe и Bi_2Se_3 », представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Рецензируемая работа посвящена представителям так называемых квантовых материалов – топологическим изоляторам и родственным системам. Они привлекают внимание исследователей высокой подвижностью поверхностных носителей тока, жесткой связью между их импульсом и спином, что дает возможность использовать в качестве носителя информации спины, а также высокой (топологической) защищенностью от всякого рода помех. При описании этих систем обычно пренебрегают локальными неоднородностями распределения заряда вдали от поверхности или края образца. Однако реальные вещества всегда содержат подобные неоднородности, равно как и различного рода дефекты. В этой связи крайне важным является исследование их влияния на транспортные свойства топологических изоляторов. Именно это определяет высокую актуальность диссертации В. А. Прудкогляда, которая посвящена экспериментальному изучению особенностей электронного транспорта в двумерных и трехмерных топологических материалах, HgTe и Bi_2Se_3 соответственно, являющихся перспективными для применения в области спинтроники,

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии, включающей 161 наименование. Общий объем диссертации 117 страниц, включая 30 рисунков и одну таблицу.

Содержание диссертации.

Диссертационная работа Прудкогляда В.А. посвящена экспериментальному изучению транспортных явлений в топологических материалах на основе HgTe и Bi_2Se_3 . По своему содержанию работа состоит из двух частей.

Первая часть посвящена изучению влияния гидростатического давления на электронные свойства двумерной электрон-дырочной системы в квантовых ямах HgTe шириной 20 нм. Данная система при нормальном давлении представляет из себя двумерный полуметалл. При повышении давления, согласно теоретическим ожиданиям, полуметаллическое перекрытие зон должно уменьшаться, что открывает возможность для образования новых конденсированных электрон-дырочных состояний типа экситонного изолятора либо для различных вариантов электрон-дырочной

жидкости. Диссертантом была выполнена серия трудоемких экспериментов по систематическому изучению магнитотранспорта в квантовых ямах HgTe в широком диапазоне давлений при низких температурах. В результате установлено, что транспортные характеристики системы изменяются с давлением немонотонным образом. Обнаружено, что при давлениях около 8-10 кбар транспорт в системе носит характер прыжков между изолированными "металлическими" областями диффузионной проводимости. При давлениях свыше 14 кбар был обнаружен переход к диэлектрическому поведению, связанный с образованием новой электроно-дырочной фазы.

Вторая часть работы Прудкогляда В. А. посвящена изучению особенностей квантового транспорта в тонких эпитаксиальных пленках трехмерных топологических изоляторов Bi_2Se_3 . В ней были проведены низкотемпературные измерения магнитотранспорта в пленках различной толщины в магнитных полях, ориентированных как перпендикулярно, так и наклонно к плоскости пленок. Установлено, что как объемные, так и поверхностные носители заряда в объемных толстых пленках проявляют себя в транспорте как двумерные. В результате анализа вклада квантовых поправок к проводимости от слабой антилокализации и от электрон-электронного взаимодействия были определены параметры электрон-электронного взаимодействия в системе. При этом обнаружены аномально большие значения константы электрон-электронного взаимодействия, что указывает на наличие в системе нескольких слабо взаимодействующих проводящих каналов.

В процессе работы диссертантом получены интересные **новые результаты**:

1. При выполнении исследований магнитотранспорта носителей в широких квантовых ямах топологического полуметалла HgTe обнаружена немонотонная зависимость сопротивления от давления, в том числе вблизи точки зарядовой нейтральности, а также сильное отрицательное магнитосопротивление.
2. При давлениях около 14 кбар и при понижении температуры ниже 10 К обнаружен резкий переход от металлического типа проводимости к диэлектрическому.
3. Удалось определить квантовые поправки к проводимости за счет электрон-электронного взаимодействия в трехмерном топологическом изоляторе Bi_2Se_3 . Их аномально большая величина объясняется возникновением в системе нескольких слабо связанных проводящих каналов, каждый из которых дает независимый вклад в K_{ee} .

Перейдем к теоретической и практической значимости диссертации:

1. Продемонстрирована эффективность применения гидростатического давления для перестройки зонной структуры и свойств HgTe.
2. Построена многомерная фазовая диаграмма магнитотранспортных свойств 2D топологического полуметалла HgTe в координатах магнитное поле-температура-давление.
3. Разработана оригинальная схема определения абсолютной величины квантовых поправок к проводимости за счет электрон-электронного взаимодействия в пленках топологических изоляторов Bi_2Se_3 .

Достоверность полученных результатов обеспечивается надежной аттестацией приготовленных образцов, применением апробированной методики исследования эффектов гидростатического давления и магнитотранспортных измерений. Полученные результаты были повторены на нескольких образцах с использованием различных методик измерения и измерительных приборов. Кроме того была проверена воспроизводимость свойств, известных из литературных данных для родственных систем.

Основные результаты диссертации отражены в 4 публикациях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе Web of Science, и неоднократно докладывались на российских и международных научных конференциях.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она заслуживает высокой оценки. Полученные в ней результаты весьма интересны и полезны. Сделанные на их основе выводы **всесторонне обоснованы** и представляют весомый вклад в понимание особенностей электронного транспорта в двумерных и трехмерных топологических материалах, перспективных для применения в области спинтроники. Диссертанту удалось аргументированно и весьма ясно изложить все полученные результаты.

Автореферат правильно и подробно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе. На мой взгляд, при обсуждении магнитосопротивления в системе Bi_2Se_3 было бы весьма целесообразно обсудить влияние на транспорт дефектов типа замещения. Дело в том, что за счет таких характерных дефектов (перестановки ионов Bi и Se) в системе формируются локальные магнитные моменты, которые могут привести к отрицательному магнитосопротивлению. (см. например L. Wang, Y. Yan, L. Zhang, Z. Liao, H. Wu and D. Yu, Zeeman effect on surface electron transport in topological insulator Bi_2Se_3 nanoribbons. *Nanoscale*, 2015,7, 16687-16694, DOI:

Список публикаций официального оппонента Г.Б. Тейтельбаума по тематике диссертации
В.А. Прудкогляда

1. Yu. Talanov, V. Sakhin, E. Kukovitskii, N. Garifyanov, G. Teitel'baum, Magnetic Resonance Study of the Bi_2Te_3 Doped with Manganese, *Appl. Magn. Resonance* (2017), Vol. 48, pp. 143-154.
2. V. Sakhin, E. Kukovitskii, N. Garifyanov, Yu. Talanov, G. Teitel'baum, Inhomogeneous State of the Bi_2Te_3 Doped with Manganese, *J. Supercond Nov. Magn.* (2017) Vol. 30, No. 1, pp. 63-67.
3. G. B. Teitel'baum, The phenomenological view at the two-component physics of cuprates, *JETP Letters* (2017) Vol. 106, No. 3, pp. 199-208.
4. Lev Gor'kov, G. Teitel'baum, On the Origin of a Small Hole Pocket in the Fermi Surface of Underdoped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, *J. Supercond Nov. Magn.* (2018), Vol. 31, No. 3, pp. 657-661.
5. V. Sakhin, E. Kukovitskii, N. Garifyanov, R. Khasanov, Yu. Talanov, G. Teitel'baum, Local magnetic moments in the topological insulators, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (2018), Vol. 459, pp. 290-294.
6. V. Sakhin, E. Kukovitsky, A. Kiiamov, R. Khasanov, Yu. Talanov, and G. Teitel'baum, To the Intrinsic Magnetism of the $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ Topological Insulator, *JETP Letters*, 2019, Vol. 109, No. 7, pp. 465-471.
7. V. Sakhin, E. Kukovitsky, Y. Talanov, G. Teitel'baum, To the Inhomogeneous Bulk State of the $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ Topological Insulator as Revealed by ESR of Charge Carriers, *JETP Letters* (2021), Vol. 113, No. 4, pp. 273-278.