

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ИЗОЛЯТОР В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

О. М. Сурдин^{1,2}, В. В. Платонов^{1,2}, Ю. Б. Кудасов^{1,2}, Д. А. Маслов^{1,2},
И. В. Макаров¹, А. С. Коршунов¹

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

²Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Топологические изоляторы (ТИ) в данный момент являются одним из наиболее перспективных новых классов соединений, вызывая при этом большой интерес с теоретической и экспериментальной точки зрения. ТИ – любая система со щелью в спектре в объеме/плоскости, но бесщелевыми состояниями на поверхности/краю.

Понятие «топологическая инвариантность» было введено математиками для того, чтобы классифицировать различные геометрические объекты внутри широких классов [1]. Для топологии не важны расстояния, но существенны инварианты, благодаря которым удобно различать действительно разные формы, не преобразуемые одна в другую. Инвариантные формы, не могут быть фундаментально изменены растяжением, сжатием или изгибами. В случае ТИ благодаря инвариантам этой топологии электроны на физической поверхности материала становятся нечувствительными к незначительным загрязнениям среды и другим возмущающим эффектам, которые, вообще говоря, имеют тенденцию разрушать их свойство проводимости. Иначе говоря, электроны топологически сопротивляются фундаментальным переменам их свойств.

Открытый в 1980 г. квантовый эффект Холла (КЭХ) стал первым примером квантового состояния, которое не подвержено самопроизвольному нарушению симметрии. В состоянии, ответственном за КЭХ, основная часть 2D-образца является изолятором и зарядовый ток течет вдоль краев структуры только в краевых проводящих одномерных (1D) каналах. Ток в каждом из них течет в одном направлении, которое определяется знаком квантующего магнитного поля. Вследствие того что краевые состояния не имеют рассеяния назад, ток в краевых каналах является бездиссипативным. Это поверхностное состояние можно связать с движением электронов по прыжковым циклотронным орбитам с отскакиванием от краев образца (рис. 1). Данное состояние определяет топологическую фазу в том смысле, что фундаментальное свойство холловской проводимости топологически защищено, т.е. остается неизменным при малых изменениях в образце, и оно не может быть изменено до осуществления квантового фазового перехода в системе [2]. Поэтому систему в

квантовом холловском состоянии можно рассматривать как ТИ.

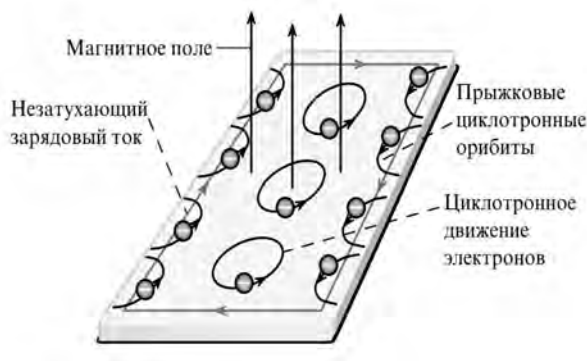


Рис. 1. Система с квантовым эффектом Холла [2]

Квантовые ямы HgTe/CdHgTe – это первая система, в которой экспериментально было обнаружено состояние двумерного топологического изолятора. Для возникновения состояния ТИ необходима инверсия зон, которая в данных КЯ реализуется при ширине d больше критической ($d_c \sim 6,3$ для доли Cd в барьере $\sim 0,7$) [3]. Одновременно с наблюдением КЭХ в данной работе проводились измерения циклотронного резонанса (ЦР), поскольку это один из наиболее мощных инструментов для исследования эволюции электронной структуры в квантовых ямах.

Методика эксперимента

В работе исследовались образцы с квантовыми ямами (КЯ) HgTe/CdHgTe, выращенные в ИПФ СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs (013) [4, 5]. Последовательно выращивались буферный слой ZnTe, релаксированный буфер CdTe, нижний барьерный слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, КЯ HgTe толщиной 8 нм, верхний барьерный слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ и покровный слой CdTe. С целью создания 2D электронного газа барьеры легировались мелкими донорами (индием) симметрично с двух сторон от КЯ (рис. 2).

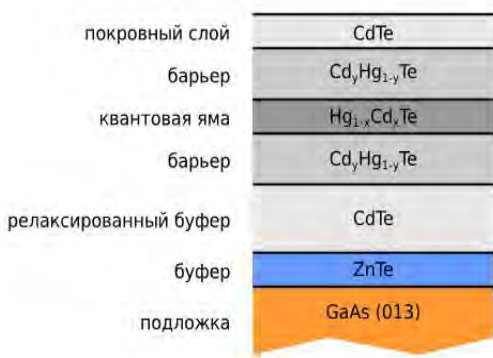


Рис. 2. Структура исследуемых образцов [3]

Измерения КЭХ и ЦР проводились в импульсных магнитных полях до 35 Тл при температуре 80 К. Использовалась криогенная система, позволяющая при необходимости плавно менять температуру в области размещения образца. Криостат помещался в отверстие ($d = 19\text{мм}$) соленоида сильного магнитного поля. В таблице представлены характеристики исследуемых образцов.

Характеристики образцов

№	x_0	d_{QW} , нм	$n_{In} \cdot 10^{16}$, см ⁻³	$d_{лег}$, нм	Структура
091223-1	0,64	8	6,7		инвертированная
100709	0,64	33	не легирован		нормальная

Для одновременного измерения циклотронного резонанса и магнетосопротивления внутри криостата

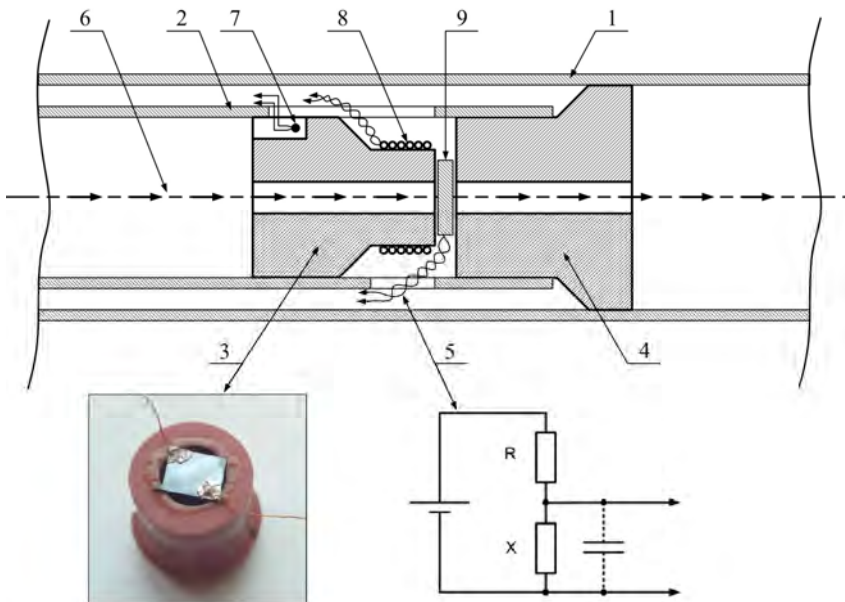


Рис. 3. Измерительная схема: 1 – криостат, 2 – измерительный штوك, 3,4 – керамические втулки, 5 – двухточечная методика, 6 – лазерное излучение, 7 – термопара, 8 – индукционный датчик, 9 – образец

была собрана измерительная схема, представленная на рис. 3 [6].

Криостат 1 и измерительный шток 2 выполнены из нержавеющей трубок диаметрами 18 и 14 мм, соответственно. На поверхности керамической втулки 3 располагались термопара 7 и индукционный датчик 8. На керамическую втулку 4 наклеивался исследуемый образец 9. Так же втулка 4 служила для центрирования измерительного штока внутри криостата и в качестве теплоотвода для образца. Провода от двухточечной методики 5, термопары 7 и индукционного датчика 8 выводились через технологические отверстия в измерительном штоке 2 и проходили по его поверхности. Для измерения магнитного поля использовался индукционный датчик, намотанный на керамическую втулку вблизи образца. Для измерения температуры образца использовалась термопара хромель-копель, расположенная на поверхности керамической втулки. Втулка изготовлена из теплопроводящей керамики на основе корунда, что обеспечивало выравнивание температуры в области установки образца и термопары.

Результаты и обсуждение

Измерения КЭХ и циклотронного резонанса проводились в импульсном магнитном поле до 35 Тл (рис. 4), которое генерировалось при разряде емкостного накопителя на ССМП. Экспоненциальное уменьшение индукции магнитного поля после максимума обусловлено работой крубарных диодов, подключенных параллельно ССМП.

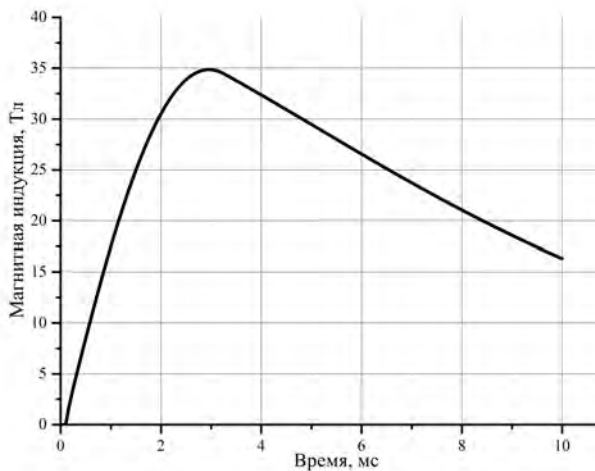


Рис. 4. Характерный импульс магнитного поля

На рис. 5 представлены результаты измерения магнетосопротивления для образца #100444 при температуре 80 К. Согласно представленным характеристикам (см. таблицу), образец обладает инвертированным зонным спектром и шириной квантовой ямы $d_{QW} = 8$ нм, что приводит к появлению в нем 1D топологически защищенного состояния. На графике наблюдается одна из «ступенек», характерных для КЭХ.

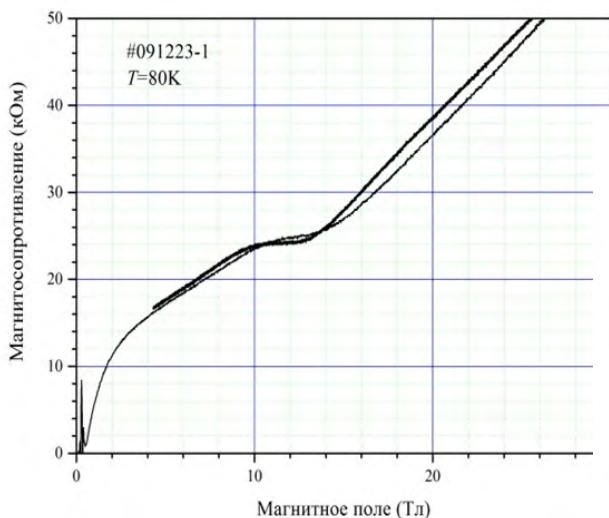


Рис. 5. Магнетосопротивление образца #091223-1

Для образца #100709 измерения магнетосопротивления и циклотронного резонанса проводились одновременно. На рис. 6 представлены результаты измерения циклотронного резонанса при температуре 80 К. Для данного образца (рис. 6) наблюдается двухпиковая структура спектра.

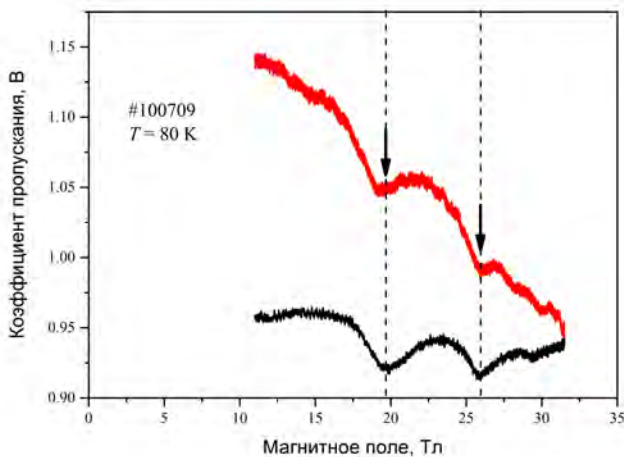


Рис. 6. Зависимость коэффициента пропускания образца от индукции магнитного поля в образце #100709

На рис. 7 представлены результаты измерения магнетосопротивления для образца #100709 при температуре 80 К. Согласно данным табл. 1, образец обладает нормальным зонным спектром и шириной квантовой ямы $d_{QW} = 33$ нм, но характерная для КЭХ «ступенка» на графике зависимости поперечного сопротивления от магнитного поля наблюдается. Это можно попытаться объяснить тем, что магнетосопротивление и циклотронный резонанс измерялись одновременно и начальное состояние образца было изменено под действием излучения CO_2 -лазера. То что в данных структурах квантовый эффект Холла наблюдается при азотных температурах указывает на высокую подвижность носителей заряда.

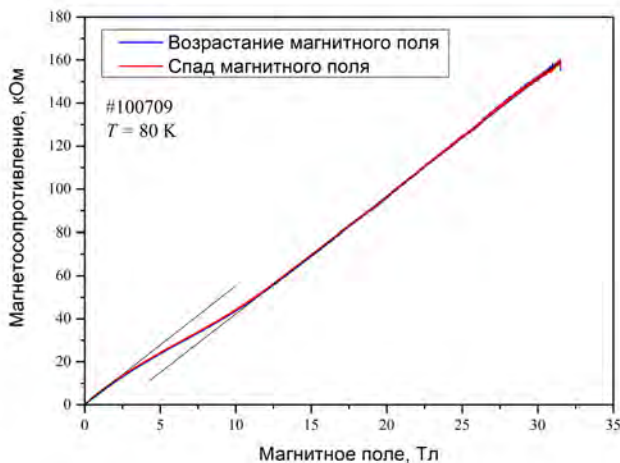


Рис. 7. Магнетосопротивление образца #100709

Следует отметить, что положения спектральных линий циклотронного резонанса и магнетосопротивления совпадают на кривых нарастания и убывания магнитного поля с точностью $\sim 0,4$ Тл. По результатам измерения ЦР и КЭХ можно определить

такие важные данные для гетероструктур как циклотронная масса носителей заряда, оценить их время жизни и населенность уровней. Так же они позволяют вносить корректирующие поправки при построении дисперсии уровней Ландау.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 16-08-00337.

Литература

1. Konig M. et al. // *Science*, 2007. 318. 766.
2. Веденеев С. И. Квантовые осцилляции в трехмерных топологических изоляторах // *УФН*, 2017. Т. 187, № 4. С. 411–429.

3. Иконников А. В. и др., Фотопроводимость в квантовых ямах HgTe/CdHgTe при различных температурах // *Материалы XXI международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника»*, 2017. Т. 2. С. 608–609.

4. Mikhailov N. N. et al. // *Int. J. Nanotechnology*, 2006. 3(1): p. 120–130.

5. Dvoretzky S. et al. // *Journal of Electronic Materials*, 2010. 39(7): p. 918–923.

6. Platonov V. V., Kudasov Yu. B., Filippov A. V., Makarov I. V., Maslov D. A., Surdin O. M. High magnetic field facility for cyclotron resonance investigation in semiconductors, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015. Vol. 43, no 1. P. 365–368.