

Аннотация

В научной квалификационной работе проведено исследование подвижности дираковских электронов в HgTe квантовых ямах с толщиной, близкой к критической $d_c \approx 6.5$ нм, соответствующей переходу от прямого спектра к инвертированному. Исследована подвижность электронов основной подзоны проводимости широкой $d = 18 - 22$ нм HgTe квантовой ямы. Детальное изучено поведение электронов в широкой, 20 - 22 нм HgTe яме в магнитном поле. Обнаружено большое спиновое расщепление зоны проводимости в асимметричной яме. А также необычное поведение уровней Ландау в яме с симметричным профилем (слияние соседних уровней, невырожденных в малом ненулевом магнитно поле, с ростом поля), связанное с особенностями спектра ямы.

Исполнитель (Ф.И.О.): Добрецова Алёна Александровна

Наименование НКР: электронный транспорт в HgTe квантовых ямах с линейным и параболическим законом дисперсии

Объект исследования: двумерный электронный газ в квантовых ямах на основе HgTe с толщиной близкой к критической ($d = 6.3 - 7.0$ нм) и широких HgTe квантовых ям ($d = 18 - 22$ нм)

Цель: исследование подвижности и механизмов рассеяния электронного газа при низкой температуре, изучение особенностей поведения электронов в магнитном поле в широких ямах

Методы исследования: магнетотранспортные измерения образцов холловской геометрии с верхним металлическим затвором, Фурье - анализ, подгонка методом наименьших квадратов, 6 - зонный k_p расчет

Научная новизна. В рамках данной работы впервые экспериментально наблюдалось немонотонное поведение подвижности электронов при рассеянии на флуктуациях толщины ямы. Оно было обнаружено при исследовании подвижности дираковских электронов в области больших концентраций. При этом исследован новый механизм рассеяния дираковских электронов на флуктуациях щели в спектре.

Установлена важная роль трансформации волновой функции электронов с ростом энергии в локализованную у гетерограницы квантовой ямы в 20 нм HgTe квантовых ямах – широких для квантовых ям и узких для трех-мерного топологического изолятора (толщиной > 70 нм). Данная трансформация влияет как на электронное рассеяние, так и на спиновое расщепление состояний в асимметричной яме.

Показано, что перемешивание состояний с симметрией зоны тяжелых дырок $|\Gamma_8, \pm 3/2\rangle$, определяющих поведение электронов основной подзоны проводимости в широкой (~ 20 нм) HgTe квантовой яме вблизи дна зоны, с электронно-подобными состояниями $|\Gamma_6, \pm 1/2\rangle$ и состояниями легких дырок $|\Gamma_8, \pm 1/2\rangle$ приводит к изменению полного момента электрона $|J_z|$ от 1.5 до 0.9 с ростом энергии. Данное изменение дает вклад в зависимость эффективного g - фактора электронов от энергии.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты, изложенные в диссертации, позволяют расширить представления о механизмах рассеяния электронов при низкой температуре и дополнить имеющиеся знания рассеяния электронов с параболическим законом дисперсии, знаниями об электронах с квази-линейным дираковским спектром.

Показано, что пространственное смещение волновых функций электронов, вызванное сильным спин - орбитальным взаимодействием, может приводить к усилению спинового расщепления в асимметричной квантовой яме.

Полученные результаты расширяют представления о поведении уровней Ландау в магнитном поле. Перемешивание электронных состояний с разным полным моментом в пределах одной подзоны размерного квантования вызывает смещение уровней Ландау в симметричной квантовой яме относительно линейной зависимости их энергии от магнитного поля и приводит к слиянию соседних уровней.

Значимость работы обусловлена также полученными новыми данными о свойствах квантовых ям на основе HgTe.

Область применения: Исследования носят фундаментальный характер.

Список ключевых слов: HgTe квантовая яма, двумерный электронный газ, подвижность, квази - линейный дираковский спектр, спин - орбитальное взаимодействие, осцилляции Шубникова – де Гааза, кр метод, уровни Ландау

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись в виде 11 докладов на 9 конференциях: 34th International conference semiconductor physics ICPS-2018 (Monpellier (France), July 29 — August 3, 2018); 22-й международный симпозиум "Нанопизика и нанопэлектроника" (Нижний Новгород, 12-15 марта 2018 г.); Международной школы по физике полупроводников "Двумерные полупроводниковые системы" (Санкт-Петербург, 1-5 марта 2018 г.); Winter school on quantum condensed-matter physics (Chernogolovka, December 13-17, 2017); 13-я российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург, 2-6 октября 2017 г.); 33rd International conference on the physics of semiconductors ICPS2016 (Beijing (China), July 31 – August 5, 2016); XXI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург, 15-20 февраля 2016 г.); 21-st International conference on electronic properties of two-dimensional systems EP2DS-21 (Sendai (Japan), July 26-31, 2015); 12-я Российская конференция по физике полупроводников (Звенигород, 21-25 сентября 2015 г.).

Публикации:

Статьи:

1. Spin splitting of surface states in HgTe quantum wells / A.A. Dobretsova, Z.D. Kvon, S.S. Krishtopenko, N.N. Mikhailov // Low Temp. Phys. - 2019. - Т.45, выпуск 2. - С.185.
2. Spin mixing between subbands and extraordinary Landau levels shift in wide HgTe quantum wells / A.A. Dobretsova, A.D. Chepelianskii, N.N. Mikhailov, Z.D. Kvon // Physical Reviv B. - 2018. - Т.98, выпуск 15. - С.155310.
3. Подвижность и квантовое время бесщелевых дираковских электронов в HgTe квантовых ямах / А.А. Добрецова, З.Д. Квон, Л.С. Брагинский, М.В. Энтин, Н.Н. Михайлов // ФТП. - 2018. - Т.52, выпуск 11. - С.1357.
4. Подвижность дираковских электронов в HgTe квантовых ямах / А.А. Добрецова, З.Д. Квон, Л.С. Брагинский, М.В. Энтин, Н.Н. Михайлов // Письма в ЖЭТФ. - 2016. - Т.104, выпуск 6. - С.402-405.

5. Поверхностные состояния в HgTe квантовой яме и рассеяние на шероховатостях / А.А. Добрецова, Л.С. Брагинский, М.В. Энтин, З.Д. Квон, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий // Письма в ЖЭТФ. - 2015. - Т.101, выпуск 5. - С.360-364.

Тезисы и труды конференций:

1. Shubnikov - de Haas oscillations in a wide (20nm) HgTe quantum well with surface states / A.A. Dobretsova, Z.D. Kvon, S.S. Krishtopenko, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky / Semiconductor physics ICPS-2018: abs. bk. Of 34th International conference (Monpellier (France), July 29 — August 3, 2018). - p.134.
2. Landau levels in HgTe quantum well - system with strong spin-orbit / A.A. Dobretsova, A.D. Chepelianskii, Z.D. Kvon, S. Gueron, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky / Semiconductor physics ICPS-2018: abs. bk. Of 34th International conference (Monpellier (France), July 29 — August 3, 2018). - p.53.
3. Проводимость и подвижность двумерных безмассовых дираковских фермионов в HgTe квантовой яме / А.А. Добрецова, З.Д. Квон, Л.С. Брагинский, М.В. Энтин, Н.Н. Михайлов / Нанопизика и наноэлектроника: сбор. тез. 22-ого международного симпозиума (Нижний Новгород, 12-15 марта 2018 г.). - Нижний Новгород: Тип. ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2018. - С.591.
4. Необычное поведение уровней Ландау в 20 нм HgTe квантовой яме / А.А. Добрецова, А.Д. Шепелянский, З.Д. Квон, С. Герон, Н.Н. Михайлов / Нанопизика и наноэлектроника: сбор. тез. 22-ого международного симпозиума (Нижний Новгород, 12-15 марта 2018 г.). - Нижний Новгород: Тип. ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2018. - С.593.
5. Добрецова, А.А. Электронный газ зоны проводимости широкой (20 нм) HgTe квантовой ямы в магнитном поле / Двумерные полупроводниковые системы: сбор. тез. Международной школы по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 1-5 марта 2018 г.)
6. Dobretsova, A.A. Berry phase and extraordinary Landau levels shift // Quantum condensed-matter physics : abs. bk. of winter school (Chernogolovka, December 13-17, 2017) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://cmp.hse.ru/data/2017/12/06/1161309001/PosterList.pdf>
7. Добрецова, А.А. Состояние топологического изолятора и биения в осцилляциях Шубникова – де Гааза в широкой яме HgTe / А.А. Добрецова, З.Д. Квон, Н.Н. Михайлов // Физика полупроводников: сбор. тез. 13-ой российской конф. (Екатеринбург, 2-6 октября 2017 г.). - Екатеринбург: Тип. «Печатное поле», 2017. - С.431.

8. Conductivity and electron mobility of 2D massless Dirac fermions in HgTe quantum well / A.A. Dobretsova, Z.D. Kvon, L.S. Braginsky, M.V. Entin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky // International Conference on the Physics of Semiconductors ICPS2016: abstr. bk. of 33rd International Conference (Beijing (China), July 31 – August 5, 2016). - P.Th-P.165 (p.288).
9. Проводимость безмассовых двумерных дираковских фермионов в HgTe квантовой яме / А.А. Добрецова, З.Д. Квон, Л.С. Брагинский, М.В. Энтин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий // Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников: сбор. тез. XXI международной зимней школы (Екатеринбург, 15-20 февраля 2016г.). - Екатеринбург: Тип. «Межрегиональный издательский центр», 2016.- С.114.
10. Surface States in HgTe Quantum Well and Interface-Roughness Scattering / A.A. Dobretsova, Z.D. Kvon, L.S. Braginsky, M.V. Entin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky // Electronic Properties of Two-Dimensional Systems EP2DS-21: abstr. bk. of 21-st International Conference (Sendai (Japan), July 26-31, 2015). - P.414.
11. Поверхностные состояния в HgTe квантовой яме и рассеяние на шероховатостях / А.А. Добрецова, Л.С. Брагинский, М.В. Энтин, З.Д. Квон, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий // Российская конференция по физике полупроводников: сбор. тез. 12-ой российской конференции (Звенигород, 21-25 сентября 2015 г.). - Москва: РИИС ФИАН, 2015. - С.244.