

## СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Шантарович В. Д.

Тараканов А. Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Кратко рассмотрены исследования по изучению эффекта Холла во всех его разновидностях. Особенное внимание уделено новейшим теоретическим и экспериментальным работам по спиновому эффекту Холла.

Исследования по эффекту Холла во всех его разновидностях находятся на переднем крае науки и технологии. Классический (*нормальный*) эффект был открыт в 1879 г. американским физиком Эдвином Гербертом Холлом (1855-1938). Он заключается в возникновении поперечной разности потенциалов в тонкой полоске металла, помещённой в магнитное поле, перпендикулярное направлению электрического тока, и связан с действием силы Лоренца на движущиеся электроны. Этот эффект имеет место в достаточно толстых металлических и полупроводниковых образцах, когда их толщина значительно больше размеров электрона.

Спустя 100 лет в 1980 г. К. фон Клитцинг в сотрудничестве с М. Пеппером и Г. Дордой провёл серию экспериментов по эффекту Холла при гелиевых температурах ( $< 4$  К) в сильном магнитном поле (15-20 Тл), взяв в качестве образца плёнку окисла толщиной 100-400 нм, входящую в МОП-структуру. В этом случае электроны, концентрирующиеся в приповерхностной области полупроводника размером около 5 нм, образуют двумерный электронный газ, энергия которого квантуется. В результате измеряемое поперечное холловское сопротивление  $R_H$  нелинейным образом зависит от концентрации носителей заряда, образуя кривую со ступеньками, на которых оно принимает квантованный ряд значений:  $R_H = h / Ne^2 = 25,183 / N$  кОм. Это явление, за которое К. фон Клитцинг удостоен Нобелевской премии по физике за 1985 г., было названо *целым квантовым эффектом Холла* (КЭХ).

В 1982 г. Д. Цуи, Х. Штёрмер и А. Госсард в низкотемпературных измерениях на гетеропереходах  $\text{GaAs} - \text{AlGa}_{1-x}\text{As}$  обнаружили квантование  $R_H$  при дробных значениях  $N$ , что эквивалентно дробному заряду. Это явление было названо *дробным квантовым эффектом Холла* (ДКЭХ). Для объяснения этого эффекта в 1983 г. Р. Лафлин предположил, что электроны в двумерном слое вследствие сильного кулоновского отталкивания образуют несжимаемую квантовую жидкость – жидкость Лафлина, которая оказалась новым, не известным ранее, квантовым состоянием двумерной взаимодействующей системы. За это открытие в 1998 году Р. Лафлину, Х. Штёрмеру и Д. Цуи была вручена Нобелевская премия по физике.

Как известно, помимо массы и заряда электрон обладает также собственным моментом импульса – спином, и, следовательно, собственным магнитным моментом, который может взаимодействовать с магнитным полем, что должно проявляться и в эффекте Холла. Помимо нормального эффекта Холла существует *аномальный* эффект, связанный с влиянием спин-орбитального взаимодействия на рассеяние спин-поляризованных носителей тока.

Соответствующий классический *спиновый эффект Холла* (СЭХ) был предсказан ещё в 1971 г. М.И. Дьяконовым и В.И. Перелем [1], которые предложили механизм спиновой релаксации в поле двумерной кристаллической решётки. СЭХ заключается в возникновении потока спина, перпендикулярного электрическому току и не связанного с переносом заряда. При этом наблюдается отклонение электронов с антипараллельными спинами к противоположным сторонам немагнитного проводника при отсутствии магнитного поля.

Существует два типа СЭХ – внешний и внутренний. Внешний СЭХ возникает в результате анизотропии рассеяния электронов на кулоновских центрах, вызванной спин-орбитальным взаимодействием. При протекании тока электроны со спином вверх относительно плоскости преимущественно рассеиваются направо, а электроны со спином вниз – налево. На боковых краях возникает избыток электронов со спином вверх и со спином вниз аналогично избыточному заряду в классическом эффекте Холла. Внешний СЭХ наблюдается в парамагнетиках и легированных полупроводниках.

Внутренний СЭХ обусловлен анизотропией движения электронов с различной ориентацией спина в кристалле. После обнаружения классического СЭХ сразу возник вопрос, не существует ли квантовый СЭХ, аналогичный КЭХ. *Квантовый спиновый эффект Холла* (КСЭХ) теоретически был предсказан С. Мураками и др. и Дж. Синовой и др. в 2003 г. [2-4]. Возможная аналогия с КЭХ представлена на рисунке. В режиме КЭХ, когда несколько подзон Ландау полностью заполнены, и наблюдается ступенька на холловском токе, вдоль краев структуры течёт незатухающий зарядовый ток. Отсутствие затухания вызвано тем, что для этого электроны должны перейти в верхние подзоны Ландау, для чего им надо преодолеть энергетический зазор. В режиме КСЭХ вдоль краев должен возникать незатухающий спиновый ток. Аналогия на этом прекращается, поскольку заряд является квантованной величиной, а проекция спина – величиной непрерывной.

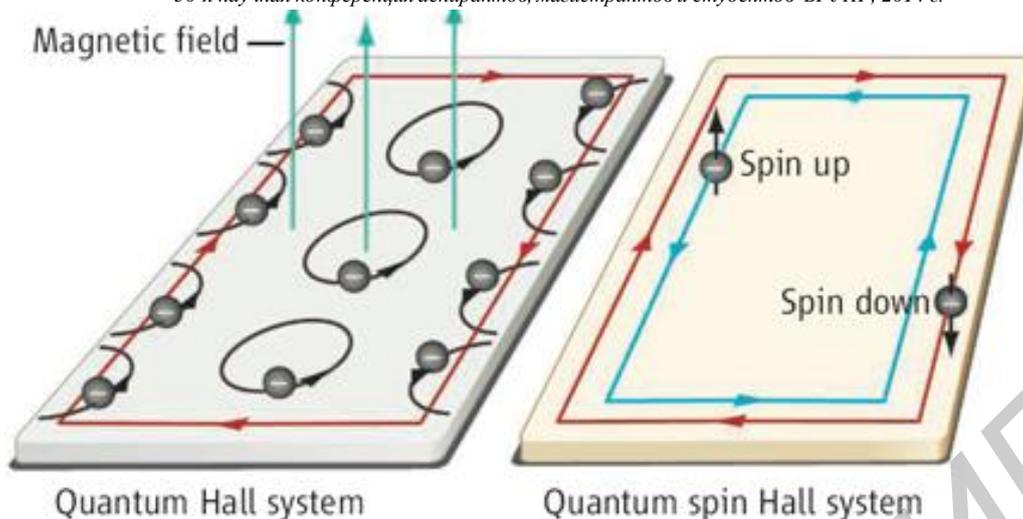


Рис.1 – Аналогия между зарядовым и спиновым эффектом Холла.  
 В режиме КЭХ (слева) по краям структуры течет незатухающий зарядовый ток.  
 В режиме КСЭХ (справа) по краям структуры течёт незатухающий спиновый ток [5].

Ясно, что этот эффект не может быть обусловлен внешним СЭХ, поскольку рассеяние на примесях неизбежно приводит к диссипации. Одного внутреннего механизма недостаточно, надо обеспечить сохранение спина при протекании спинового тока, чтобы все-таки выйти на аналогию с обычным КЭХ. Теоретики предложили использовать новое состояние материи – спиновый изолятор. Это состояние может возникать в результате спин-орбитального взаимодействия, приводящего к возникновению запрещённой зоны. Возможно, переход к такому состоянию происходит в гетероструктурах узкозонных полупроводников, например, CdTe/HgTe/CdTe. В режиме спинового изолятора нижняя зона заполнена электронами только с одной ориентацией спина, а до другой зоны имеется щель. Зарядовый ток течь не может, а вот спиновый ток – может, причем, незатухающий.

Впервые КСЭХ был экспериментально обнаружен группой исследователей Калифорнийского университета в тонких полупроводниковых пленках [6]. Эффект выражается в дискретности проводимости и в появлении на боковых гранях образца спин-поляризованных электронов даже в отсутствие магнитного поля. В 2006 г. была предсказана теоретическая возможность КСЭХ в квантовой стенке – полупроводниковой структуре, которая является макроскопической в одном направлении, но в поперечном направлении имеет толщину всего в несколько атомов [7]. Это предсказание нашло подтверждение в эксперименте Кёнига и его коллег, изучавших соединение HgTe/Hg<sub>0,3</sub>Cd<sub>0,7</sub>Te [8]. При толщине стенки более 6,3 нм было заметно плато остаточной проводимости, которая не зависит от толщины образца, поскольку она обусловлена свойствами электронов только у его границ. Также было отмечено, что остаточная проводимость разрушается магнитным полем малой величины, что свидетельствует о наличии поляризации по механизму КСЭХ. Это косвенно свидетельствует о существовании спинового изолятора и краевых состояний в СЭХ.

Спинтроника является быстро развивающейся областью физики, затрагивающей фундаментальные свойства материи. В последнее время в физике полупроводников все возрастающий интерес вызывают спиновые явления, широко обсуждаются перспективы создания твердотельных приборов спинтроники – устройств, использующих как электрический заряд, так и спин. Для будущих практических применений СЭХ важен тем, что он позволяет управлять спиновыми токами в спинтронных устройствах с помощью одних только электрических полей без участия магнитного поля. Использование спинового эффекта Холла может стать тем окном, через которое можно изучать поведение сложных квантовых систем и получить знания, которые позже можно будет применить на практике.

Список использованных источников:

1. Дьяконов, М.И. О возможности ориентации электронных спинов током. / М.И.Дьяконов, В.И. Перель. // Письма в ЖЭТФ. – 1971. – № 13. – Вып. 11. – С. 657-660.
2. Murakami, S. Dissipationless Quantum Spin Current at Room Temperature. / S. Murakami, N. Nagaosa, Shou-Cheng Zhang. // Science, – 2003. – V. 301. – № 5638. – P. 1348-1351.
3. Sinova, J. Universal intrinsic spin Hall effect. / J. Sinova, D. Culcer, Q Niu, N. A. Sinitsyn, T. Jungwirth, A. H. MacDonald. // Phys. Rev. Lett. – 2004. – V. 92. – № 12. – P/ 126603.
4. Murakami, S. Spin Hall Insulator. / S. Murakami, N. Nagaosa, Shou-Cheng Zhang. // Phys. Rev. Lett. – 2004. – V. 93. – № 15. – P. 156804.
5. Nagaosa, N. A New State of Quantum Matter. // Science. – 2007. – V. 318. – № 5851. – P. 758-759.
6. Kato, Y.K. Observation of the Spin Hall Effect in Semiconductors. / Y.K. Kato, R.C. Myers, A.C. Gossard, D.D. Awschalom. // Science. – 2004. – V. 306. – № 5851. – P. 1910-1913.
7. Bernevig, B.A. Quantum Spin Hall Effect and Topological Phase Transition in HgTe Quantum Wells. / B.A. Bernevig, T.L. Hughes, Shou-Cheng Zhang. // Science. – 2006. – V. 314. – № 5806. – P. 1757-1761.
8. König, M. Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells. / M. König, et al. // Science. – 2007. – 318. – № 5851. – P. 766-770.