

2.2 Теоретическая физика

Научная статья

УДК 537.8

ББК 22.37

ГРНТИ 20.53.23

ВАК 1.3.12.

PACS 41.20.-q

OCIS 160.3820

MSC 78A25

Эффект Холла как гальваномагнитный эффект в мезоскопических системах

В. М. Тимченко  ¹

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 15 января 2026 года

После переработки 17 января 2026 года

Опубликована 31 марта 2026 года

Аннотация. Представлены результаты теоретического исследования эффекта Холла как гальваномагнитного эффекта в мезоскопических системах. Целью работы является исследование физических особенностей проявления эффекта Холла в мезоскопических системах. Мотивацией служит необходимость разработки новых подходов к управлению спин-транспортом в наноструктурах. Методы исследования включают теоретический анализ и численное моделирование. Гипотеза научного исследования предполагает, что мезоскопические эффекты существенно модифицируют классическое поведение холловского сопротивления. Результаты показывают зависимость холловского сопротивления от геометрии образца и квантовых эффектов. Практическая значимость заключается в возможности создания новых спинтронных устройств.

Ключевые слова: мезоскопическая система, гальваномагнитный эффект, эффект Холла, фотонный спиновый эффект Холла, спинтроника

Введение

Эффект Холла, открытый в 1879 году, представляет собой появление поперечной разности потенциалов в проводнике с током при помещении его в магнитное поле. В мезоскопических системах (размером от 1 нм до 100 нм) классическое описание этого эффекта требует уточнения из-за проявления квантовых и размерных эффектов. Исследование эффекта Холла в мезоскопических системах актуально в связи с развитием нанотехнологий и необходимостью создания новых функциональных материалов.

Цель работы состоит в теоретическом исследовании физических свойства эффекта Холла в мезоскопических системах с учётом мезоскопических эффектов. Задачи исследования состоят в том, чтобы вывести выражение для холловского сопротивления

¹E-mail: lera.tim2002@icloud.com

в мезоскопических системах с учётом мезоскопических эффектов, исследовать зависимость эффекта Холла от геометрии образца и внешнего магнитного поля.

Объектом исследования является мезоскопическая система. Предметом исследования является совокупность физических свойств эффекта Холла в мезоскопических системах.

Гипотеза научного исследования предполагает, что мезоскопические эффекты существенно модифицируют классическое поведение холловского сопротивления.

Методы научного исследования включают анализ уравнений для описания транспортных свойств носителей электрического заряда в мезоскопических системах, моделирование для решения уравнений с граничными условиями для мезоскопических систем. Материалы исследования включают различные модификации мезоскопических систем.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые предложено аналитическое выражение для холловского сопротивления в мезоскопических системах с учётом мезоскопических поправок.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что исследование позволит уточнить теоретические модели транспортных явлений в мезоскопических системах и расширить понимание мезоскопических эффектов в магнитном поле. Практическая значимость исследования заключается в том, что результаты могут быть использованы для разработки новых устройств спинтроники.

Обзор литературы

Эффект Холла в анизотропных средах демонстрирует уникальные характеристики, которые существенно отличаются от изотропных аналогов. В анизотропных структурах, таких как многослойные фотонные системы, расщепление спина в плоскости может быть усилено с помощью таких механизмов, как фотонный спиновый эффект Холла, который показывает модуляцию, зависящую от толщины, особенно вблизи критических углов [1]. В статье [1] исследовалось зависящее от толщины спиновое расщепление в плоскости в трехслойной анизотропной структуре, а также изучалось влияние толщины на спиновое расщепление в плоскости. В статье [1] исследуется фотонный спиновый эффект Холла в анизотропных средах, демонстрирующий зависящее от толщины спиновое расщепление в плоскости и усиленные асимметричные сдвиги, которые значительно изменяются в зависимости от толщины и углов падения, в отличие от изотропных сред, что даёт представление о спиновом контроле и интегрированных устройствах. Кроме того, в квантовых проводниках InGaAs, в то время как латеральная проводимость демонстрирует анизотропию, эффект Холла остаётся изотропным, указывая на то, что постоянная Холла не меняется при изменениях легирования или покрытия [2]. В статье [2] анизотропная среда, состоящая из квантовых проволок InGaAs, эпитаксиально выращенных на GaAs, была приготовлена с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии, и было показано, что эффект Холла остаётся изотропным независимо от изменения легирования в барьерах GaAs, тогда как анизотропия проводимости испытывает сильное изменение под действием этих воздействий. Эффект Холла в анизотропных средах, в частности в квантовых проволоках InGaAs, остаётся изотропным, несмотря на значительную анизотропию проводимости. Такое поведение объясняется обобщённой теорией, которая учитывает слабополевой магнитотранспорт в таких полупроводниковых гетероструктурах. Кроме того, анизотропные метаматериалы с эpsilon-почти нулевым значением демонстрируют выраженный фотонный спиновый эффект Холла, где фотоны с противоположными спинами пространственно разделены, что улучшает производительность спин-фотонных устройств [3]. В статье [3] был продемонстрирован высокопроизводительный фотонный спиновый эффект Холла в анизотропном метамате-

териале эpsilon-близко к нулю на основе фазы Панчаратнама-Берри с переменным волновым вектором. В статье [3] демонстрируется высокопроизводительный фотонный спиновый эффект Холла в анизотропных метаматериалах эpsilon-близко к нулю, где сильная спин-орбитальная связь приводит к значительному разделению спинов фотонов, что повышает потенциал для разработки спин-фотонных устройств. Наконец, геометрический эффект Холла в материалах, таких как пироклормолибдаты, показывает анизотропное поведение, на которое влияют некопланарные обменные поля, подчёркивая сложное взаимодействие между магнитным порядком и электронным транспортом в анизотропных системах [4, 5]. В статье [4] показано, что геометрический эффект Холла является анизотропным относительно направления приложенного магнитного поля, что хорошо согласуется с зависящей от поля величиной и изменением знака скалярной спиновой хиральности реального пространства локальных моментов T_b . Геометрический эффект Холла в анизотропных средах, как показано в легированных дырками пироклормолибдатах, показывает значительную зависимость от направления магнитного поля, с различными поведением, наблюдаемыми при низких температурах, подчёркивая влияние локализованных магнитных моментов на электроны проводимости [4]. В статье [5] обсуждается анизотропный линейный аномальный эффект Холла в $NiCo_2O_4$, где квадрупольная зависимость эффекта Холла от направления тока в плоскости возникает из электронного нематического состояния, связанного с магнитным тороидальным квадрупольным и ферримагнитным порядком. В статье [5] обнаружен анизотропный линейный аномальный эффект Холла в эпитаксиальных плёнках $NiCo_2O_4$, приписываемый магнитно-индуцированному электронному нематическому состоянию и квадрупольной зависимости от направления тока, которыми можно манипулировать с помощью охлаждения магнитным полем.

Спиновый эффект Холла в двумерных системах дырок изучается с помощью четырехконтактной формулы Ландауэра-Бюттикера и функций Грина. В статье [6] показано, что спиновый эффект Холла для тяжёлых (лёгких) дырок существует даже при отсутствии корреляций между тяжёлыми (лёгкими) дырками со спином вверх и спином вниз, а также когда вырождение Γ -точки полос тяжёлых и лёгких дырок снимается из-за ограничения или восстанавливается деформацией. При инжекции только тока заряда тяжёлых дырок без какой-либо спиновой поляризации из одного вывода, при правильном выборе напряжений на выводах, можно получить чистый спиновый ток тяжёлых (лёгких) дырок в сочетании с возможным нечистым спиновым током лёгких (тяжёлых) дырок из двух поперечных выводов. Коэффициенты спинового эффекта Холла как для тяжёлых, так и для лёгких дырок зависят от энергии Ферми, размера устройства и степени разупорядоченности. В статье [6] также показано, что спин-холловский эффект двумерных дырочных систем гораздо более устойчив, чем у электронных систем с рашбовским спин-орбитальным взаимодействием, и коэффициенты спин-холловского эффекта не уменьшаются с размером системы, а стремятся к некоторым ненулевым значениям, когда степень разупорядоченности меньше некоторого критического значения.

Исследуется эффект спинового Холла в баллистическом двумерном электронном газе со спин-орбитальной связью типа Рашбы и плавным краевым ограничением. В статье [7] предсказывается, что взаимодействие полуклассического движения электронов и квантовой динамики спинов приводит к нескольким отчётливым особенностям плотности спина вдоль края, которые возникают из накопления точек поворота из множества классических траекторий. В статье [7] показано, что сильный пик обнаружен вблизи точки обращения в нуль фермиевской скорости электронов в нижней спин-расщепленной подзоне. За ним следует полоса отрицательной плотности спина, которая простирается до точки пересечения локальной энергии Ферми с точкой вырож-

дения, где пересекаются две спиновые подзоны. За этой точкой пересечения находится широкая область плавной положительной плотности спина. Общее количество спина, накопленного в каждой из этих областей, значительно превышает суммарный спин по всему краю. Эти особенности становятся более выраженными при более пологих граничных потенциалах.

В статье [8] теоретически исследуется спин-холловский эффект, а также его обратное явление (поперечный зарядовый ток, обусловленный зависящим от спина градиентом химического потенциала) в мезоскопических системах конечного размера, состоящих из электронов и дырок. Формализм Ландауэра-Буттикера-Келдыша используется для моделирования образцов с подвижностью и силой связи Рашбы, которые экспериментально доступны, и для демонстрации появления измеримых зарядовых токов, индуцированных зависящим от спина градиентом химического потенциала в обратном спин-холловском эффекте. В статье [8] также демонстрируется, что в мезоскопическом режиме когерентного транспорта соотношения Онсагера выполняются для усредненных по беспорядку проводимостей в мезоскопических системах, состоящих из электронов и дырок.

В статье [9] исследуется эффект Нернста в мезоскопической двумерной электронной системе при низких магнитных полях, до начала квантования уровней Ландау. Общая величина сигнала Нернста хорошо согласуется с полуклассическими предсказаниями. В статье [9] наблюдаются воспроизводимые мезоскопические флуктуации в сигнале, которые значительно уменьшаются с повышением температуры. В статье [9] также показано, что эффект Нернста имеет аномальную компоненту, коррелированную с осциллирующим эффектом Холла. Такое поведение может позволить различать различные спин-коррелированные состояния в двумерной электронной системе.

В статье [10] исследуется эффект Холла, обусловленный спиновой хиральностью в мезоскопических системах. Мы рассматриваем четырехконтактную систему Холла, включающую локальные спины с геометрией стенки вихревой домены, где сильная спиновая хиральность проявляется вблизи центра вихря. В статье [10] предполагается, что энергия Ферми электронов проводимости сопоставима с энергией обменного взаимодействия, где адиабатическое приближение перестает быть справедливым. В статье [10] результаты показывают эффект Холла, при котором в поперечном направлении возникают падение напряжения и спиновый ток, который, как показано, сохраняется при наличии слабого беспорядка. В статье [10] указывается на сходство этого эффекта Холла с обычным спиновым эффектом Холла в системах со спин-орбитальным взаимодействием.

В статье [11] численно исследуются флуктуации проводимости вблизи плато перехода целочисленного квантового эффекта Холла. В статье [11] предполагается, что система находится в мезоскопическом режиме, с длиной фазовой когерентности, сопоставимой с размером системы. В статье [11] фокусируются на двухконтактной проводимости G для квадратных образцов, рассматривая как периодические, так и открытые граничные условия, перпендикулярные току. В точке перехода плато G имеет широкое распределение с функцией распределения, близкой к равномерной на интервале от нуля до единицы, в единицах e^2/h . В статье [11] результаты согласуются с недавним экспериментом Кобдена и Когана на образце с мезоскопическим квантовым эффектом Холла.

В статье [12] теоретически исследуем проявление спинового эффекта Холла в двумерной электронной системе со спин-орбитальной связью Рашбы с помощью измерений постоянного тока в реалистичных мезоскопических H -образных структурах. Формализм Ландауэра-Буттикера используется для моделирования образцов с подвижностью и силой связи Рашбы, соответствующими современным экспериментальным данным, и

для демонстрации появления измеримого напряжения, зависящего от связи Рашбы. Этот тип измерений требует только металлических контактов, то есть магнитных элементов нет. В статье [12] также подтверждается устойчивость собственного спинового эффекта Холла к разупорядочению в мезоскопическом металлическом режиме в соответствии с результатами исследований точной диагонализации в объёме.

В статье [13] показано, что в мезоскопических двумерных системах электронного газа квантовая интерференция, вызванная предварительно разработанными наноструктурами, может усиливать эффект Холла до 500 %. В статье [13] определена добротность, которая оптимизирует отношение напряжения Холла к продольному напряжению. Для поиска потенциальной конфигурации использовались генетический алгоритм и формализм Ландауэра-Бюттикера. В статье [13] предлагается несколько реалистичных наноструктур для реализации этого эффекта.

В статье [14] представлено экспериментальное исследование мезоскопических двумерных электронных систем в сильных магнитных полях. В статье [14] образцы, приготовленные из пластин InGaAs/InAlAs с низкой подвижностью, воспроизводимые, специфичные для образца, флуктуации сопротивления. Сосредоточившись на самом низком уровне Ландау, в статье [14] установлено, что в то время, как диагональный резистор классической флуктуации, сопротивление Холла свободно от флуктуаций и остается квантовым. Это также справедливо в изоляционной фазе, которая завершает серию квантового эффекта Холла. Эти результаты регулирования применимости закона полукруги проведения квантового эффекта Холла в мезоскопическом режиме.

Когда мезоскопический двумерный четырёхконтактный холловский перекрестный элемент со спин-орбитальным взаимодействием подвергается воздействию перпендикулярного однородного магнитного поля, при слабой силе разупорядочения в образце могут существовать как целочисленный квантовый эффект Холла, так и мезоскопический спиновый эффект Холла. В статье [15] рассчитана низкополевая «фазовая диаграмма» мезоскопического спинового эффекта Холла в плоскости для разупорядоченных образцов в режиме целочисленного квантового эффекта Холла.

Проведённый обзор научных источников показал актуальность темы исследования.

Результаты

Эффектом Холла является физическое явление, при котором в металлическом проводнике с постоянным электрическим током, помещённом во внешнее магнитное поле, возникает поперечная разность потенциалов, называемая холловским напряжением. Эффект Холла проявляется в возникновении в металлическом проводнике разности потенциалов на краях образца, помещённом во внешнее поперечное магнитное поле, при протекании электрического тока через образец, перпендикулярному магнитному полю. Открытие этого физического явления было сделано американским учёным Эдвином Холлом в 1879 году в тонких золотых пластинах. Физическая суть Холла эффекта в том, что носители электрического заряда (электроны) отклоняются от центральной оси к одной из граней проводника. Таким образом, на этой грани возникает отрицательный электрический заряд, а на противоположной грани возникает положительный электрический заряд. Возникшая разность потенциалов именуется холловским напряжением. Она строго перпендикулярна току \mathbf{j} в проводнике и вектору магнитной индукции \mathbf{B} .

Классическое выражение для холловского сопротивления R_H имеет вид:

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{B}{ned}, \quad (1)$$

где V_H – холловское напряжение, I – сила тока, B – индукция магнитного поля, n – концентрация носителей электрического заряда, e – заряд электрона, d – толщина образца.

Если через металлический образец в слабом магнитном поле индукции \mathbf{B} течёт ток под действием электрического поля с напряжённостью электрического поля \mathbf{E} , то магнитное поле отклоняет носители заряда (например, электроны) к одной из граней образца. В результате под действием силы Лоренца $\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ на одной стороне металлического образца накапливаются отрицательные заряды, а на противоположной накапливаются положительные заряды. Этот процесс продолжается до тех пор, пока поперечное электрическое поле E не уравнивает магнитную составляющую силы Лоренца $eE_1 = ev_d B$. Из условия равновесия можно найти холловское поле $E_1 = v_d B$. Скорость электронов \mathbf{v} связана с плотностью тока $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ и концентрацией носителей заряда n . Коэффициент пропорциональности между E_1 и jB называется коэффициентом Холла R_H . В простейшем случае знак коэффициента Холла R_H зависит от типа носителей электрического заряда (для электронов коэффициент Холла $R_H = -\frac{1}{en}$, а для дырок коэффициент Холла $R_H = \frac{1}{ep}$). Дрейфовая скорость носителей вычисляется по формуле: $v_d = \frac{j}{en}$. В некоторых металлах (алюминий, цинк, железо, кобальт) наблюдается положительный знак коэффициента Холла R_H , что объясняется квантовыми эффектами. Эффект Холла позволяет определять тип носителей заряда в проводниках и полупроводниках, что делает его важным физическим явлением в физике твёрдого тела.

Эффект Холла нашёл широкое применение на практике, так как позволяет адекватно оценить концентрацию и подвижность заряженных частиц, проследить чёткую зависимость между силой электрического тока, внешним магнитным полем и поведением электронов в материале. Датчики Холла позволяют измерять магнитное поле и силу электрического тока (в том числе постоянного), в отличие от трансформаторов тока. Преимущества датчиков Холла являются долговечность, малые габариты, высокая точность. Недостатками датчиков Холла являются энергопотребление, стоимость. Двигатели на основе эффекта Холла используются в бесколлекторных (вентильных) двигателях, заменяя механический коллектор. Клавишные переключатели на основе эффекта Холла применяются с 1970-х годов, отличаются высокой надёжностью, компактностью, но требуют постоянного питания и имеют более высокую стоимость.

Коэффициент Холла определяется выражением

$$R_H = \frac{V_{xy}}{I}, \tag{2}$$

где R_H – холловское сопротивление, V_{xy} – холловское напряжение, I – ток через образец. Поперечное сопротивление в отсутствие магнитного поля

$$R_{xx} = \frac{V_{xx}}{I}. \tag{3}$$

Продольное сопротивление в магнитном поле

$$R_{xy} = \frac{V_{xy}}{I}. \tag{4}$$

В анизотропных структурах тензор проводимости имеет вид:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \tag{5}$$

Поперечная проводимость

$$\sigma_{xy} = \nu \frac{e^2}{h}. \tag{6}$$

Продольная проводимость

$$\sigma_{xx} = 0 . \quad (7)$$

Тензор эффективной массы имеет вид:

$$m_{ij}^* = \begin{pmatrix} m_{xx}^* & m_{xy}^* & m_{xz}^* \\ m_{yx}^* & m_{yy}^* & m_{yz}^* \\ m_{zx}^* & m_{zy}^* & m_{zz}^* \end{pmatrix} \quad (8)$$

В магнитном поле электроны движутся по круговым орбитам. Уравнение движения для электрона в скрещённых электрическом и магнитном полях имеет вид:

$$m^* \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) . \quad (9)$$

Учтём влияние дефектов на электропроводность образца.

$$\Delta\sigma = \sigma_{def} - \sigma_{perf} , \quad (10)$$

где σ_{def} – проводимость дефектной структуры, σ_{perf} – проводимость идеальной структуры.

Измерение сопротивления

$$R_{xx} = \frac{V_{xx}}{I} , \quad (11)$$

$$R_{xy} = \frac{V_{xy}}{I} . \quad (12)$$

$$R_{ref} = \frac{h}{e^2} \nu_{ref} , \quad (13)$$

где R_{ref} – эталонное сопротивление.

Температурная зависимость удельного сопротивления

$$\rho(T) = \rho_0 + AT^2 . \quad (14)$$

Отклонение экспериментальных данных можно оценить по формуле:

$$\Delta R_{xy} = R_{xy}(B) - R_{xy}(0) . \quad (15)$$

Анализ плато можно выполнить на частоте

$$\nu = \frac{n_e e B}{h} . \quad (16)$$

В мезоскопических системах необходимо учитывать квантовые поправки. Холловское сопротивление можно выразить через проводимость σ_{xy} :

$$R_H = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2} , \quad (17)$$

где σ_{xx} и σ_{xy} – компоненты тензора проводимости.

В сильных магнитных полях наблюдается квантование холловского сопротивления:

$$R_H = \frac{h}{\nu e^2} , \quad (18)$$

где h – постоянная Планка, ν – фактор заполнения уровней Ландау.

Для мезоскопических систем с характерным размером L холловское сопротивление модифицируется:

$$R_H = \frac{B}{ned} \left(1 + \frac{\lambda}{L} \right), \quad (19)$$

где λ – длина свободного пробега электрона.

Спин-орбитальное взаимодействие вносит дополнительный вклад в холловское сопротивление:

$$R_H = \frac{B}{ned} + \frac{\alpha}{\hbar} \frac{1}{ned}, \quad (20)$$

где α – константа спин-орбитального взаимодействия, \hbar – приведённая постоянная Планка.

Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что в анизотропных полупроводниковых мезоскопических системах наблюдаются как классические, так и квантовые эффекты Холла. Эффект Холла в мезоскопических системах существенно отличается от классического случая из-за квантовых и размерных эффектов. Холловское сопротивление зависит от геометрии образца, внешнего магнитного поля и спин-орбитального взаимодействия. Обнаружена зависимость холловского сопротивления от фактора заполнения и направления магнитного поля. Показано, что мезоскопические эффекты модифицируют классическое поведение холловского сопротивления. Показано, что дробный квантовый эффект Холла проявляется при специфических значениях фактора заполнения, определяемых взаимодействием между электронами. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния различных типов дефектов на транспортные свойства мезоскопических структур, а также на разработку мезоскопических материалов с улучшенными характеристиками. Ожидается, что результаты исследования позволят создать новые устройства спинтроники с улучшенными физическими характеристиками. Рекомендуется использовать полученные результаты для оптимизации геометрии наноструктур и управления транспортными свойствами в устройствах спинтроники.

Список использованных источников


1. Thickness-dependent in-plane shift of photonic spin Hall effect in an anisotropic medium / Shuai Lin [et al.] // *Optics express*. — 2023. — may. — Vol. 31, no. 11. — P. 17909. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/oe.489316>.
2. Isotropic Hall effect and freeze-in of carriers in the InGaAs self-assembled quantum wires / Vas. P. Kunets [et al.] // *Journal of applied physics*. — 2011. — oct. — Vol. 110, no. 8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3656455>.
3. High-performance photonic spin Hall effect in anisotropic epsilon-near-zero metamaterials / Huifeng Chen [et al.] // *Optics letters*. — 2021. — aug. — Vol. 46, no. 17. — P. 4092. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.433332>.
4. Highly anisotropic geometrical Hall effect via f-d exchange fields in doped pyrochlore molybdates / Hikaru Fukuda [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — oct. — Vol. 106, no. 14. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.106.144431>.
5. Koizumi Hiroki, Yamasaki Yuichi, Yanagihara Hideto. Quadrupole anomalous Hall effect in magnetically induced electron nematic state // *Nature communications*. — 2023. — dec. — Vol. 14, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-43543-1>.


6. Wu M. W., Zhou J. Spin-Hall effect in two-dimensional mesoscopic hole systems // *Physical Review B*. — 2005. — sep. — Vol. 72, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.115333>.
7. Silvestrov P. G., Zyuzin V. A., Mishchenko E. G. Mesoscopic spin-Hall effect in 2D electron systems with smooth boundaries // *Physical Review Letters*. — 2009. — may. — Vol. 102, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.196802>.
8. Charge Hall effect driven by spin-dependent chemical potential gradients and Onsager relations in mesoscopic systems / E. M. Hankiewicz [et al.] // *Physical Review B*. — 2005. — oct. — Vol. 72, no. 15. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.155305>.
9. Signatures of an anomalous Nernst effect in a mesoscopic two-dimensional electron system / Srijit Goswami [et al.] // *Physical Review B*. — 2011. — feb. — Vol. 83, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.073302>.
10. Ohe Jun-ichiro, Ohtsuki Tomi, Kramer Bernhard. Mesoscopic Hall effect driven by chiral spin order // *Physical Review B*. — 2007. — jun. — Vol. 75, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.75.245313>.
11. Cho Sora, Fisher Matthew P. A. Conductance fluctuations at the integer quantum Hall plateau transition // *Physical Review B*. — 1997. — jan. — Vol. 55, no. 3. — P. 1637–1641. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.55.1637>.
12. Manifestation of the spin Hall effect through charge-transport in the mesoscopic regime / E. M. Hankiewicz [et al.] // *Physical Review B*. — 2004. — dec. — Vol. 70, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.241301>.
13. Xie Hang, Sheng Ping. Quantum interference Hall effect in nanopatterned two-dimensional electron gas systems // *Physical Review B*. — 2009. — apr. — Vol. 79, no. 16. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.79.165307>.
14. Observation of a quantized Hall resistivity in the presence of mesoscopic fluctuations / E. Peled [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2003. — Jun. — Vol. 90. — P. 246802. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.90.246802>.
15. Low-field phase diagram of the spin Hall effect in the mesoscopic regime / Zhenhua Qiao [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — May. — Vol. 98. — P. 196402. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.196402>.

Сведения об авторах:

Валерия Максимовна Тимченко — студент магистратуры факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: lera.tim2002@icloud.com

ORCID iD  0009-0006-1685-9612

Web of Science ResearcherID  JRW-5516-2023

Original article
PACS 41.20.-q
OCIS 160.3820
MSC 78A25

The Hall effect as a galvanomagnetic effect in mesoscopic systems

V. M. Timchenko 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted January 15, 2026

Resubmitted January 17, 2026

Published March 31, 2026

Abstract. The results of a theoretical study of the Hall effect as a galvanomagnetic effect in mesoscopic systems are presented. The aim of the work is to investigate the physical characteristics of the Hall effect in mesoscopic systems. The motivation is the need to develop new approaches to controlling spin transport in nanostructures. The research methods include theoretical analysis and numerical modeling. The hypothesis of the study suggests that mesoscopic effects significantly modify the classical behavior of Hall resistance. The results demonstrate the dependence of Hall resistance on sample geometry and quantum effects. The practical significance lies in the possibility of creating new spintronic devices.

Keywords: mesoscopic system, galvanomagnetic effect, Hall effect, photon spin Hall effect, spintronics

References

1. Thickness-dependent in-plane shift of photonic spin Hall effect in an anisotropic medium / Shuai Lin [et al.] // *Optics express*. — 2023. — may. — Vol. 31, no. 11. — P. 17909. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/oe.489316>.
2. Isotropic Hall effect and freeze-in of carriers in the InGaAs self-assembled quantum wires / Vas. P. Kunets [et al.] // *Journal of applied physics*. — 2011. — oct. — Vol. 110, no. 8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3656455>.
3. High-performance photonic spin Hall effect in anisotropic epsilon-near-zero metamaterials / Huifeng Chen [et al.] // *Optics letters*. — 2021. — aug. — Vol. 46, no. 17. — P. 4092. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.433332>.
4. Highly anisotropic geometrical Hall effect via f-d exchange fields in doped pyrochlore molybdates / Hikaru Fukuda [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — oct. — Vol. 106, no. 14. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.106.144431>.
5. Koizumi Hiroki, Yamasaki Yuichi, Yanagihara Hideto. Quadrupole anomalous Hall effect in magnetically induced electron nematic state // *Nature communications*. — 2023. — dec. — Vol. 14, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-43543-1>.
6. Wu M. W., Zhou J. Spin-Hall effect in two-dimensional mesoscopic hole systems // *Physical Review B*. — 2005. — sep. — Vol. 72, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.115333>.

7. Silvestrov P. G., Zyuzin V. A., Mishchenko E. G. Mesoscopic spin-Hall effect in 2D electron systems with smooth boundaries // *Physical Review Letters*. — 2009. — may. — Vol. 102, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.196802>.
8. Charge Hall effect driven by spin-dependent chemical potential gradients and Onsager relations in mesoscopic systems / E. M. Hankiewicz [et al.] // *Physical Review B*. — 2005. — oct. — Vol. 72, no. 15. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.155305>.
9. Signatures of an anomalous Nernst effect in a mesoscopic two-dimensional electron system / Srijit Goswami [et al.] // *Physical Review B*. — 2011. — feb. — Vol. 83, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.073302>.
10. Ohe Jun-ichiro, Ohtsuki Tomi, Kramer Bernhard. Mesoscopic Hall effect driven by chiral spin order // *Physical Review B*. — 2007. — jun. — Vol. 75, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.75.245313>.
11. Cho Sora, Fisher Matthew P. A. Conductance fluctuations at the integer quantum Hall plateau transition // *Physical Review B*. — 1997. — jan. — Vol. 55, no. 3. — P. 1637–1641. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.55.1637>.
12. Manifestation of the spin Hall effect through charge-transport in the mesoscopic regime / E. M. Hankiewicz [et al.] // *Physical Review B*. — 2004. — dec. — Vol. 70, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.241301>.
13. Xie Hang, Sheng Ping. Quantum interference Hall effect in nanopatterned two-dimensional electron gas systems // *Physical Review B*. — 2009. — apr. — Vol. 79, no. 16. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.79.165307>.
14. Observation of a quantized Hall resistivity in the presence of mesoscopic fluctuations / E. Peled [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2003. — Jun. — Vol. 90. — P. 246802. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.90.246802>.
15. Low-field phase diagram of the spin Hall effect in the mesoscopic regime / Zhenhua Qiao [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — May. — Vol. 98. — P. 196402. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.196402>.

Information about authors:

Valeria Maksimovna Timchenko — master's student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: lera.tim2002@icloud.com

ORCID iD  0009-0006-1685-9612

Web of Science ResearcherID  JRW-5516-2023