ВикипедиЯ

Квантовый эффект Холла

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Ква́нтовый эффе́кт Хо́лла — эффект квантования холловского сопротивления или проводимости двумерного электронного газа в сильных магнитных полях и при низких температурах[1]. Квантовый эффект Холла (КЭХ) был открыт Клаусом фон Клитцингом (совместно с Г. Дордой и М. Пеппером) в 1980 году[2][1], за что впоследствии, в 1985 году, он получил Нобелевскую премию[3].

Содержание

Введение
- Двумерный электронный газ
- Энергетический спектр носителей заряда в магнитном поле
- Эффект Холла

Целочисленный квантовый эффект Холла
- Экспериментальная установка
- Качественная интерпретация целочисленного квантового эффекта Холла
- Влияние неоднородностей
- О сопротивлении, проводимости и потенциале в условиях квантования холловского сопротивления

Дробный квантовый эффект Холла

Качественное объяснение дробного квантового эффекта Холла

См. также

Примечания
- Литература

Ссылки

Введение

Эффект состоит в том, что при достаточно низких температурах в сильных магнитных полях на графике зависимости поперечного сопротивления (отношения возникающего поперечного напряжения к протекающему продольному току) вырожденного двумерного электронного газа (ДЭГ) от величины нормальной составляющей к поверхности ДЭГ индукции магнитного поля (или от концентрации при фиксированном магнитном поле) наблюдаются участки с неизменным поперечным сопротивлением или «плато».

Фон Клитцинг обнаружил так называемый **нормальный (или целочисленный) квантовый эффект Холла** (КЭХ)[1], когда значения сопротивления на «плато» равно $\rho_{xy} = h/\nu e^2$, где e — заряд электрона, h — постоянная Планка, ν — натуральное число, называемое фактором заполнения уровней Ландау (рис. 1).

В 1982 году Д. Цуи и Х. Штёрмер открыли дробный квантовый эффект Холла (фактор заполнения при этом становится меньше единицы)[5].

Уже первая работа[2] по КЭХ, названная «Новый метод определения постоянной тонкой структуры с высокой точностью по квантованию холловского сопротивления» показала, что возможно его применение в качестве стандарта сопротивления. В настоящее время известно, что значения квантованного сопротивления Холла не зависят от качества образца и его материала. Поэтому, начиная с 1990 года, калибровки сопротивлений основаны на КЭХ с фиксированным значением $R_э$ = 25812.807557(18) Ом.

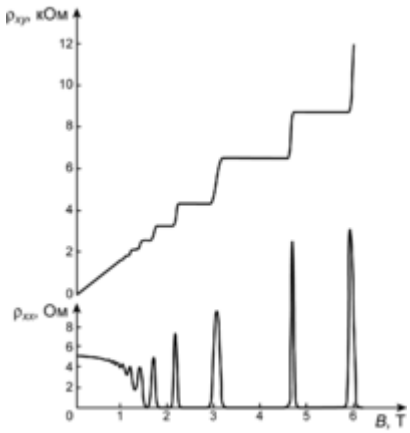


Рис. 1. Зависимости холловского сопротивления и удельного сопротивления от магнитного поля при постоянной концентрации носителей. На зависимости холловского сопротивления наблюдаются «плато»[4].

Для наблюдения КЭХ существует ряд условий, которые должны выполняться, чтобы квантование было точным. Ниже приведены основные предпосылки возникновения плато.

Двумерный электронный газ

Если ограничить трёхмерный электронный газ в одном из направлений, таким образом, что в потенциальной яме (например, с ограничивающим потенциалом по оси Z) заполнен только один уровень размерного квантования, то говорят, что электронный газ стал двумерным. В этом случае движение в плоскости, перпендикулярной оси Z остаётся свободным и энергетический спектр ДЭГ выражается формулой:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m}(k_x^2 + k_y^2) + E_n,$$

где n = 0, 1, 2..., m — эффективная масса квазичастиц (электронов или дырок). Только если заполнен основной уровень размерного квантования (первая подзона размерного квантования) говорят о формировании ДЭГ[6].

Энергетический спектр носителей заряда в магнитном поле

На классические заряженные частицы, движущиеся в магнитном поле, действует сила Лоренца. Эта сила заставляет частицу двигаться по окружности с угловой скоростью $\omega_c = eB/mc$, называемой циклотронной частотой (система единиц СГС). Согласно квантовой теории частицы, совершающие периодическое движение, обладают только дискретными значениями энергии, поэтому у заряженных частиц в магнитном поле появляются уровни энергии, называемые уровнями Ландау. Энергия k-го уровня, если пренебречь составляющей импульса p_z и наличием спина у частицы, определяется выражением[7]

$$E_k = \left(k + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_c.$$

Энергетический спектр двумерного электронного газа становится полностью дискретным и каждый энергетический уровень обладает следующим вырождением (число орбит, которые могут принадлежать уровню Ландау)

$$N_H = \frac{S}{2s_0} = \frac{SeB}{\hbar c} = \frac{S}{2\pi l_B^2} = \frac{BS}{\Phi_0}, \quad (1)$$

где Φ_0 — квант магнитного потока. Это аналогично плотной упаковке циклотронных орбит в двумерном слое. Эту же величину можно получить, если представить, что из всех частиц ДЭГ, расположенных в интервале энергий, равных $\hbar\omega_c$ (то есть произведение двумерной плотности состояний $D_0 = \frac{m}{\pi\hbar^2}$ на энергию $\hbar\omega_c$), формируется отдельный уровень Ландау.

Концентрация электронов в ДЭГ в магнитном поле определяется по формуле $n_s = NN_H$, если уровень Ферми попадает в щель между уровнями Ландау. В общем случае частичное заполнение одного из уровней Ландау характеризуется так называемым *фактором заполнения* $\nu = \frac{n_s}{N_H} = \frac{n_s h}{eB}$ — отношение концентрации ДЭГ к вырождению уровней Ландау. Он может принимать как целые, так и дробные значения[6].

Эффект Холла

Явление, открытое Холлом в 1879 году, состоит в том, что в проводнике с током, помещённом в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока, возникает электрическое поле в направлении, перпендикулярном направлениям тока и магнитного поля. Сила Лоренца $F_L = eBv$ заставляет электроны отклоняться в направлении, перпендикулярном их скорости v. В результате происходит накопление разноимённых зарядов на краях проводника, и между боковыми гранями образца возникнет разность потенциалов V_H, а внутри него — электрическое поле E_H, называемое полем Холла и уравновешивающее силу Лоренца.

Ток через образец равен $I = nevS$, где n — концентрация электронов, S — площадь поперечного сечения проводника: $S = bd$, где b — его ширина, d — толщина.

Условие равенства силы Лоренца и силы, вызванной холловским полем, есть $eE_H = eV_H/b = evB$. Отсюда следует, что $V_H = bvB = IvB/nevd = IB/end = IR_H$, где R_H называется холловским сопротивлением. В двумерных системах $R_H = B/en_s$, где n_s — поверхностная концентрация электронов.

Важно отметить, что R_H — это отношение возникающей поперечной разности потенциалов к продольному току, $R_H = R_{xy} = V_y/I_x$. При этом продольное сопротивление $R_L = R_{xx} = V_x/I_x$, слабо зависит от индукции магнитного поля, оставаясь по величине близким к своему значению при $B = 0$[8].

Целочисленный квантовый эффект Холла

Как было замечено Клитцингом[2], при измерении эффекта Холла в инверсном слое кремниевого МОП транзистора при низких температурах (T ~ 1 K) и в сильных магнитных полях (B > 1 Тл) линейная зависимость холловского сопротивления сменяется чередой ступеней (плато) как показано на Рис. 2. Величина сопротивления на этих ступеньках равна комбинации фундаментальных физических констант, делённой на целое число ν:

$$R_H = \frac{h}{\nu e^2}$$

Когда на зависимости холловского сопротивления R_H наблюдается плато, продольное электрическое сопротивление становится очень малой величиной (оно равно нулю с высокой экспериментальной точностью). При низких температурах ток в образце может течь без диссипации (рассеяния).

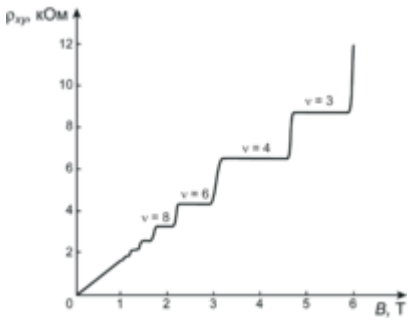
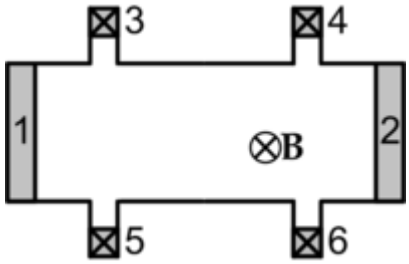


Рис. 2. Зависимости холловского сопротивления от магнитного поля. На зависимости холловского сопротивления указаны факторы заполнения для некоторых «плато».

Прецизионные измерения также показали, что на точности квантования R_H не сказываются такие существенные параметры эксперимента, как размеры образцов, влияние границ и важное в обычном эффекте Холла закорачивание холловского напряжения омическими контактами, а также степень совершенства структур, то есть наличие большого количества примесей и дефектов, тип материала, в котором находится 2D-электронный газ, температура и сила измерительного тока. Экспериментальная точность квантования так высока, что встал вопрос о метрологических применениях КЭХ: проверке формул квантовой электродинамики с помощью прецизионного определения постоянной тонкой структуры или создания нового эталона сопротивления.

Экспериментальная установка

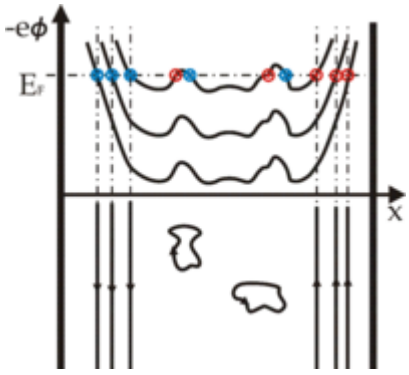
Для наблюдения эффекта гетероструктуру со сформированным двумерным электронным газом помещают в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости электронного газа. При пропускании тока через образец измеряют ток, а также возникающее напряжение вдоль и поперёк образца.



Геометрия измерения квантового эффекта Холла. $R_H=V_{35}/I_{12}$ $R_L=V_{34}/I_{12}$

Качественная интерпретация целочисленного квантового эффекта Холла

Целочисленный квантовый эффект Холла может быть просто интерпретирован на основе модели краевых состояний. Как правило, экспериментальный образец с двумерным электронным газом имеет границу, задаваемую литографическим краем или краем области под затвором. Возле края формируется обедняющее электрическое поле, направленное к краю (речь идёт об отрицательно заряженных электронах). Оно приводит к зависимости нуля отсчёта уровней Ландау от координаты, поэтому уровни Ландау «изгибаются» вверх вблизи края. Как известно в скрещенных магнитном и электрическом полях заряженная частица дрейфует вдоль линии постоянной энергии — эквипотенциали. Электроны заполняют состояния согласно статистике Ферми — Дирака до некоторого уровня Ферми, и при факторе заполнения ν, близком к целочисленному значению вдали от краёв формируются локализованные состояния, не участвующие в проводимости, а вблизи краёв — краевые токовые состояния. Причем ток на противоположных берегах двумерного электронного газа имеет противоположное направление, а направление обхода однозначно задаётся знаком квантующего магнитного поля. Ток переносимый каждым краевым



Электроны дрейфуют вдоль линий постоянной энергии, формируя локализованные и краевые токовые состояния

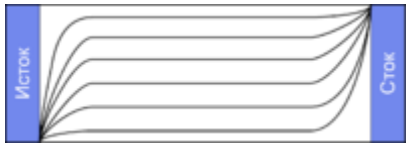
состоянием квантован и равен $\frac{e^2}{h}\mu$, где μ — значение электрохимического потенциала. А число краевых каналов целое и определяется фактором заполнения ν. В этом случае, когда локализованные и подвижные состояния на уровне Ферми пространственно разделены и обратное рассеяние подавлено, реализуется режим квантового эффекта Холла.

Влияние неоднородностей

Дефекты, примеси и другие неоднородности в кристалле, которые локализуют, «изолируют» отдельные электроны в «ловушках», являются причиной возникновения широких плато на графиках холловского сопротивления и широких минимумов омического сопротивления. На поверхности кристалла остаются дефекты и примеси, которые порождают энергетические «долины» и «холмы». Когда уровень Ландау оказывается заполненным, некоторые из них попадают в ловушку и изолируются. Они больше не принимают участие в процессах электропроводности через кристалл. Локализованные электроны первыми заполняют и освобождают уровни Ландау при изменении магнитного поля, поддерживая точное заполнение уровней Ландау в энергетически гладкой области кристалла для протяженных интервалов величины магнитного поля. При этом холловское сопротивление образца и магнитосопротивление остаются постоянными. Локализованные благодаря дефектам кристалла электроны представляют собой хранилище необходимых для точного заполнения уровней Ландау носителей в энергетически гладкой области кристалла для конечного интервала напряженностей магнитных полей. Само существование целочисленного квантового эффекта Холла зависит от наличия дефектов в кристалле. Без неоднородностей в кристалле, «идеально чистая» система приводила бы к линейному эффекту Холла, без квантованности[9].

О сопротивлении, проводимости и потенциале в условиях квантования холловского сопротивления

Дробный квантовый эффект Холла



Эквипотенциали в образце с двумя контактами в условиях квантового эффекта Холла.

В 1982 году Даниэль Цуи (Daniel Tsui) и Хорст Штёрмер (Horst Störmer) заметили, что «плато» в холловском сопротивлении наблюдаются не только при целых значениях n, но и в существенно более сильных магнитных полях[5] при n=1/3. В дальнейшем были обнаружены плато электрического сопротивления и при других дробных значениях n, например при n=2/5, 3/7…

Природа дробного квантового эффекта Холла была объяснена Р. Лаффлином в 1983 году[10]. В 1998 году Цуи, Штёрмер и Лаффлин получили Нобелевскую премию по физике за открытие и объяснение этого явления[11]

Качественное объяснение дробного квантового эффекта Холла

Суть явления заключается в том, что группа электронов «объединяются» в новую «частицу», заряд которой меньше заряда электрона. Дробный квантовый эффект Холла нельзя объяснить на основе поведения одиночных электронов в магнитном поле. Причина заключается во взаимодействии между электронами. Магнитное поле создает «вихри», по

одному на каждый квант магнитного потока. Принцип Паули требует, чтобы каждый электрон был окружен одним «вихрем». Когда магнитные поля превышают величину, соответствующую ЦКЭХ с i=1, вихрей становится больше, чем электронов. Принцип Паули выполняется при размещении нескольких вихрей на электроне, которые уменьшают межэлектронное кулоновское отталкивание. Электрон «захватывает» квант магнитного потока и становится «составной частицей». С точки зрения теории, такие «составные частицы» описывать гораздо легче, чем «свободные» электроны. Захваченный квант потока меняет природу частиц, «превращая» фермионы в бозоны. Электрон, захвативший четное число квантов потока, становится фермионом, а нечетное число квантов потока — бозоном. При заполнении на 1/3 нижнего уровня Ландау каждый электрон принимает три кванта магнитного потока. Таким образом получается композитный бозон. Он находится в условиях нулевого магнитного поля (оно уже включено в новую частицу) и в состоянии бозе-конденсации в новом энергетическом состоянии. Можно определить энергетическую щель, необходимую для возникновения квантования холловского сопротивления и для обращения в ноль обычного сопротивления, экспериментальными методами. Когда часть вихрей магнитного поля не захвачена, возникает дробный дефицит заряда в каждом из этих вихрей. По сравнению с электронами, это положительные дробные заряды. Квазичастицы могут свободно двигаться и проводить электрический ток. Образование плато на графиках происходит как и в целочисленном квантовом эффекте Холла, из-за флуктуаций потенциала на дефектах кристалла. Отличие в том, что носители электрического тока — не электроны, а частицы с дробным зарядом. Дробный квантовый эффект Холла объясняется захватом нечетного числа вихрей магнитного потока каждым электроном[12].

См. также

- Эффект Холла
- Спиновый эффект Холла
- Дробный квантовый эффект Холла
- Фазовый интеграл
- Квантовый композитный резонатор Холла

Примечания

1. *Слюсар В. И.* Наноантенны: подходы и перспективы (https://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_178_132.pdf) // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2009. — № 2. — С. 61.
2. K. v. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980) doi:10.1103/PhysRevLett.45.494 (https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.45.494)
3. Нобелевский лауреат по физике за 1985 год (http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1985/klitzing-lecture.html)
4. К. фон Клитцинг «Квантовый эффект Холла: Нобелевские лекции по физике — 1985 г.» УФН **150**, 107 (1986).
5. D. C. Tsui, H. L. Störmer, A. C. Gossard Two-Dimensional Magnetotransport in the Extreme Quantum Limit Phys. Rev. Lett. **48**, 1559 (1982). doi:10.1103/PhysRevLett.48.1559 (https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.48.1559)
6. Ando T., Fowler A. B. and Stern F. Electronic properties of two-dimensional systems Rev. Mod. Phys. **54**, 437 (1982).

7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц «Теоретическая физика», в 10 т, т. 3 «Квантовая механика (нерелятивистская теория)», М., Физматлит, 2002, 808 с., ISBN 5-9221-0057-2 (т. 3), гл. 15 «Движение в магнитном поле», п. 112 «Движение в однородном магнитном поле», с. 554—559;
8. *Askerov, B. M.*. Electron Transport Phenomena in Semiconductors, 5-е изд (англ.). — Singapore: World Scientific, 1994. — P. 416.
9. В. К. Воронов, А. В. Подоплелов «Современная физика», учебное пособие, М., КомКнига, 2005, 512 с., ISBN 5-484-00058-0, гл. 4 «Полупрводники», п 4.7 «Квантовый эффект Холла», пп 4.7.4 «Целочисленный квантовый эффект Холла», с. 249—253;
10. R. B. Laughlin, Anomalous Quantum Hall Effect: An Incompressible Quantum Fluid with Fractionally Charged Excitations Phys. Rev. Lett. **50**, 1395 (1983) doi:10.1103/PhysRevLett.50.1395 (https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.50.1395)
11. Нобелевские лауреаты по физике за 1998 год (http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1998/)
12. В. К. Воронов, А. В. Подоплелов «Современная физика», учебное пособие, М., КомКнига, 2005, 512 с., ISBN 5-484-00058-0, гл. 4 «Полупроводники», п 4.7 «Квантовый эффект Холла», пп 4.7.5 «Дробный квантовый эффект Холла», с. 253—259;

Литература

- *О. В. Кибис* «Квантовый эффект Холла» (https://web.archive.org/web/20170517043847/http://old.zntu.edu.ua/base/i3/rpf/k2/pogosov-lect/9909_089.pdf.pdf) // СОЖ **9**, 89 (1999).
- *Laughlin R. B.* Quantized Hall conductivity in two dimensions // Phys. Rev. B — 1981. — Vol. 23 — P. 5632. doi:10.1103/PhysRevB.23.5632 (https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevB.23.5632)
- *Halperin B. I.* Quantized Hall conductance, current-carrying edge states, and the existence of extended states in a two-dimensional disordered potential // Phys. Rev. B — 1982. — Vol. 25 — P. 2185. doi:10.1103/PhysRevB.25.2185 (https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevB.25.2185)
- *Quantum Hall Effect Observed at Room Temperature*, Magnet Lab Press Release (https://web.archive.org/web/20071222020625/http://www.magnet.fsu.edu/mediacenter/news/pressreleases/2007february15.html) (англ.)

Ссылки

- Квантовый эффект Холла в двумерных системах (http://virlib.eunnet.net/mif/text/n0299/5.html) — научно-популярная статья в электронном журнале МИФ, № 2, (1998—1999).
- Квазичастицы с удивительными свойствами в твердых телах (http://elementy.ru/video?pubid=431226) — научно-популярная лекция на Элементы.ру

Источник — https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Квантовый_эффект_Холла&oldid=114840509

Эта страница в последний раз была отредактирована 11 июня 2021 в 13:47.

Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; в отдельных случаях могут действовать дополнительные условия.
Wikipedia® — зарегистрированный товарный знак некоммерческой организации Wikimedia Foundation, Inc.