

ДРОБНЫЙ КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА ДВУМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ В КРЕМНИЕВОЙ МДП-СТРУКТУРЕ

М.Г.Гаврилов, З.Д.Квон¹⁾ И.В.Кукушкин, В.Б.Тимофеев

В магнитотранспортных свойствах двумерного электронного газа в кремниевой МДП-структуре при $H = 8 - 11$ Т и $T = 1,7$ К обнаружены квантовые особенности не только в области целочисленных значений фактора заполнения ν , но и при дробных значениях ν : $2/3, 4/3, 5/3, 7/3, 8/3, 6/5, 7/5$. Последние особенности обусловлены эффектами межэлектронного взаимодействия и указывают на возможное упорядочение в двумерной электронной системе.

Исследования свойств двумерного электронного газа, которые наиболее интенсивно ведутся в последние годы ¹, привели к открытию квантового эффекта Холла ². Суть этого эффекта состоит в том, что в зависимости холловского сопротивления ρ_{xy} от плотности электронного газа n в достаточно сильных магнитных полях и низких температурах при плотностях электронов, отвечающих полному заполнению очередного квантового состояния (при $n = \nu e^2 H / h$, где ν – фактор заполнения, целое число), отчетливо наблюдаются участки с постоянными значениями (или плато) $\rho_{xy} = h/e^2 \nu$. Отклонение зависимости $\rho_{xy}(n)$ от постоянного значения на этих участках могло составлять 10^{-6} от самой величины ρ_{xy} и уменьшалось при понижении температуры. Одновременно с постоянством ρ_{xy} при заполнении очередного уровня (т. е. при $\nu = 1, 2, 3, \dots$) сопротивление $R_x \sim \rho_{xx}$ достигало минимального значения и его величина стремилась к нулю при понижении температуры. Эксперименты такого рода были выполнены как на кремниевых МДП-структурах, так и на гетеропереходах и выявили множество сходных черт, что свидетельствует о широкой общности наблюдаемых явлений ³.

Сравнительно недавно в электронных слоях пространственного заряда в гетеропереходах были обнаружены дополнительные особенности в зависимостях $\rho_{xy}(H)$ и $\rho_{xx}(H)$, отвечающие дробным значениям фактора заполнения ^{4, 5}. Исходно эти особенности весьма предположительно интерпретировались как проявление вигнеровской кристаллизации электронов. Позднее Лафлиным ⁶ было предложено другое объяснение дробного квантового эффекта Холла в терминах несжимаемой ферми-жидкости.

В настоящей работе сообщается о наблюдении квантового эффекта Холла при дробных значениях фактора заполнения в инверсионном электронном канале кремниевой МДП-структуры при $T = 1,7$ К и $H = 8 \div 11$ Т.

Работа выполнялась на МДП-структуре, изготовленной на плотности (001) кремния p -типа. Подвижность электронов в инверсионном канале при $T = 4,2$ К была очень высокой по сравнению с известными в литературе подвижностями для кремниевых МДП-структур и достигала в максимуме величины $4 \cdot 10^4$ см²/В·с при напряжении на затворе $V_g = 4$ В (см. рис. 1). Именно это обстоятельство, на наш взгляд, и позволило отчетливо наблюдать аномалии квантового эффекта Холла в наших экспериментах. Образец имел прямоугольную геометрию с двумя парами контактов, образующих холловские мостики в форме квадрата со стороной 400 мкм. Величину измерительного тока можно было менять в интервале от 10^{-9} до 10^{-7} А без существенных изменений в зависимостях $\rho_{xx}(V_g)$ и $\rho_{xy}(V_g)$. Во всем динамическом диапазоне изменений токов вольт-амперные характеристики сохранили омический характер. Подчеркнем также, что в условиях эксперимента развертка V_g осуществлялась столь медленно, что гистерезисы, связанные с процессами установления и проявляющиеся при быстрых развертках V_g , в нашем случае полностью исключались.

¹⁾ Институт физики полупроводников СО АН СССР, Новосибирск

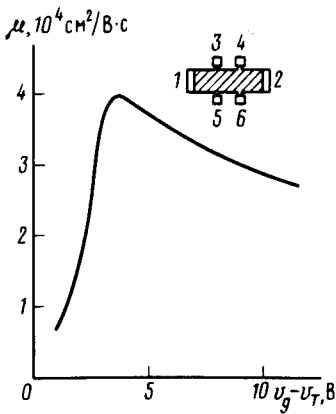


Рис. 1

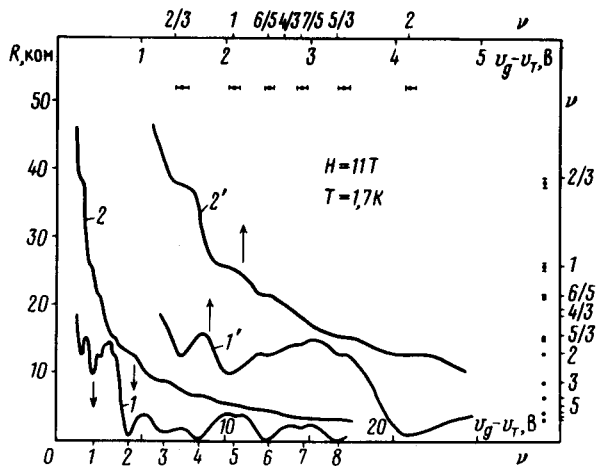


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость подвижности электронов в инверсионном канале от величины прижимающего напряжения V_g на затворе при $T = 4,2\text{K}$. Справа сверху – геометрия расположения контактов в кремниевой МДП-структуре: 3, 4, 5; 6 – контакты холловских мостиков, 1, 2 – сток и исток соответственно, заштрихован – затвор, V_T – пороговое напряжение

Рис. 2. Зависимости холловского сопротивления ρ_{xy} (кривые 2 и 2') и сопротивления ρ_{xx} (кривые 1 и 1') от величины напряжения на затворе V_g отсчитанного от порогового напряжения V_T , при $T = 1,7\text{K}$ и $H = 8,8\text{T}$. По абсциссам показаны шкалы напряжений V_g и факторов заполнения для кривых 1 и 2 – внизу, для кривых 1' и 2' – вверху. По ординате слева – шкала сопротивлений в кОм и соответствующая ей шкала факторов заполнения – справа. Масштаб для кривых 1 и 1' по шкале сопротивлений увеличен в два раза

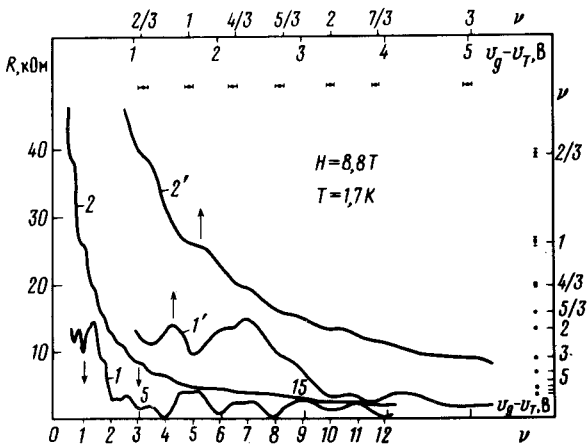


Рис. 3

Рис. 3. Зависимости холловского сопротивления ρ_{xy} (кривые 2 и 2') и сопротивления ρ_{xx} (кривые 1 и 1') от величины напряжения на затворе V_g отсчитанного от порогового напряжения V_T , при $T = 1,7\text{K}$ и $H = 11\text{T}$. По абсциссам показаны шкалы напряжений V_g и факторов заполнения для кривых 1 и 2 – внизу, для кривых 1' и 2' – вверху. По ординате слева – шкала сопротивлений в кОм и соответствующая ей шкала факторов заполнения – справа. Масштаб для кривых 1 и 1' по шкале сопротивлений увеличен в два раза

На рис. 2 и рис. 3 представлены записанные при $T = 1,7\text{K}$, $H = 8,8\text{T}$ и $H = 11\text{T}$ зависимости сопротивлений ρ_{xx} и ρ_{xy} от напряжения на затворе (отсчитанного от порогового напряжения V_T), которое задает концентрацию двумерных электронов: $n = (\epsilon_0 \epsilon / de)(V_g - V_T)$, где $\epsilon = 3,9$, $d = 1660 \text{ \AA}$ – диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрика. Видно, что помимо ярко выраженных плато в $\rho_{xy}(n)$ и минимумов в $\rho_{xx}(n)$, появляющихся при больших значениях фактора заполнения ν (особенно четких при ν кратных 4, когда полностью заполняется очередной уровень Ландау) наблюдаются дополнительные особенности – минимумы в ρ_{xx} и точки перегиба в ρ_{xy} . Важно подчеркнуть, что эти особенности возникают в зависимостях ρ_{xx} и ρ_{xy} одновременно.

Существует три независимых способа определения фактора заполнения в этих особых точках. Прежде всего можно найти ν из значения ρ_{xy} в особой точке: $\nu = h/e^2 \rho_{xy}$, и, кроме того, из положения особых точек на кривых $\rho_{xx}(n)$ и $\rho_{xy}(n)$ в шкале V_g : $\nu = nh/eH = (\epsilon_0 \epsilon / de^2 H)(V_g - V_T)$. Разброс в значениях фактора заполнения, найденных независимо этими тремя способами всегда был невелик и определял ошибку в ν (см. рис. 2 и рис. 3).

Вследствие эффектов сильной локализации при $T = 1,7\text{К}$ мы могли проводить надежные измерения ρ_{xx} и ρ_{xy} лишь при $(V_g - V_T) \geq 0,9\text{В}$ или $n \geq 1,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, поэтому область $\nu \leq 0,5$ при $T = 1,7\text{К}$ и $H = 8 \div 11\text{Т}$ оказалась для нас недоступной. В области $\nu > 0,5$ при $T = 1,7\text{К}$ и $H = 8 \div 11\text{Т}$ нами были обнаружены семь дробных значений ν с нечетными знаменателями, а именно: $2/3, 4/3, 5/3, 7/3, 8/3, 6/5, 7/5$, из которых четыре последние дроби наблюдались впервые. Обнаружение новых дробей для ν с большими числителями (дробь $8/3$ наблюдалась при $H = 8\text{Т}$) обусловлено, по-видимому, тем, что в полях $H = 8 \div 11\text{Т}$ соответствующие этим дробям особенности в ρ_{xy} и ρ_{xx} возникают в области значений прижимающих напряжений на затворе $V_g = 3 \div 5\text{В}$, где наблюдается максимум электронной подвижности. Обнаружение дробей в области, где $\nu > 2$, свидетельствует о том, что для наблюдения дробного квантового эффекта Холла не требуется ориентация электронов по спину и их принадлежность к одной долине.

Найденные особенности в зависимостях $\rho_{xy}(n)$ и $\rho_{xx}(n)$ несомненно связаны с межэлектронным взаимодействием. Следует подчеркнуть, что характеры взаимодействия электронов в гетеропереходах и МДП-структурах могут отличаться. Для МДП-структуры, где двумерный электронный газ отличается кулоновским дальним действием, применимость теории Лафлина ⁶ не является очевидной. В связи с этим возникает вопрос: какому коллективному состоянию системы двумерных электронов отвечают наблюдающиеся аномалии квантового эффекта Холла в МДП-структурах. Не исключено, что эти аномалии являются следствием упорядочения электронной плотности в исследованной двумерной электронной системе.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.А.Бычкову, В.Ф.Гантмахеру, Ю.А.Осипьяну, В.Л.Покровскому, Э.И.Рашаба, А.Л.Талапову, Д.И.Хмельницкому и А.В.Чаплику за чрезвычайно полезные дискуссии. Нам особенно приятно поблагодарить В.Т.Долгополова и С.И.Дорожкина за плодотворные обсуждения экспериментальных аспектов работы и ее результатов.

После написания настоящей статьи появилась публикация ⁷, в которой сообщается о наблюдении особенностей в зависимости $\rho_{xy}(n)$ в кремниевой МДП-структуре при факторах заполнения $\nu = 2/3, 4/3$.

Литература

1. Ando T., Fowler A.B., Stern F. Rev. Mod. Phys., 1982, 54, 437.
2. Von Klitzing K., Dorda G., Pepper M. Phys. Rev. Lett., 1980, 45, 494.
3. Von Klitzing K. Proc. 16-th Intern. Conf. Phys. Semic. Part 11, Ed. M. Averous, North-Holland, 6 - 10 Sept. 1982, Montpellier, France, p. 682.
4. Tsui D.C., Störmer H.L., Gossard A.C. Phys. Rev. Lett., 1982, 48, 1559; Proc. 16-th Intern. Conf. Phys. Semic. Part II, 6 - 10 Sept., 1982, Montpellier, France Ed. M. Averous, North-Holland, p. 687.
5. Störmer H.L., Chang A., Tsui D.C., Hwang J.C.M., Gossard A.C., Wiegmann W. Phys. Rev. Lett., 1983, 50, 1953.
6. Laughlin R.B. Phys. Rev. Lett., 1983, 50, 1395.
7. Пудалов В.М., Семенчинский С.Г. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 143.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Институт физики полупроводников
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
19 марта 1984 г.