

В. М. Пудалов, С. Г. Семенчинский. | Изучение гальваномагнитных свойств двумерного слоя электронов в кремнии в условиях квантования холловского сопротивления. Как известно¹, для двумерного (2M) слоя электронов, помещенного в квантующее магнитное поле H , перпендикулярное слою,

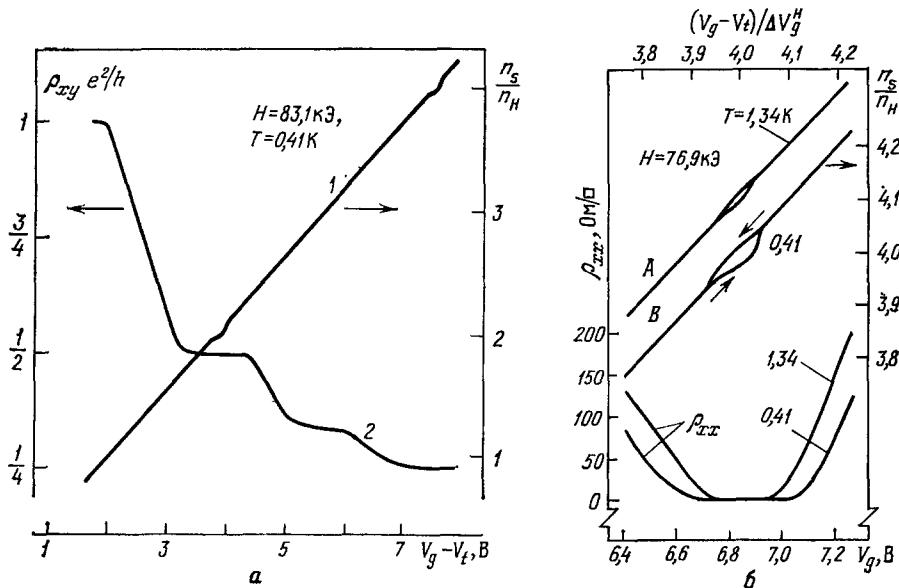


Рис. 1. Зависимости концентрации электронов n_s в 2M-слое и компонент тензора сопротивления ρ_{xy} от напряжения на затворе V_g ($dV_g/dt = 1 \text{ В/с}$).
 а — $\rho_{xy}(V_g)$ и $n_s(V_g)$ в магнитном поле 83,1 кЭ при $T = 0,41 \text{ К}$; б — участок зависимостей $\rho_{xy}(V_g)$ и $n_s(V_g)$ вблизи $V=4$ при двух значениях температуры в поле 76,9 кЭ (кривая А смещена, для наглядности, вверх по оси ординат; ΔV_g^H — интервал по V_g между серединами соседних минимумов или плато)

наблюдается ступенчатая зависимость холловского сопротивления $\rho_{xy} = h/(ve^2)$ (где $v = 1, 2, \dots$) и исчезновение диагональной компоненты тензора сопротивления $\rho_{xx} \approx 0$ при изменении концентрации электронов в 2M-слое (рис. 1). Минимальные отклонения от этих идеальных соотношений, которые могут быть зарегистрированы в эксперименте, определяются в основном аппаратурными ограничениями и составляют $(\delta\rho_{xy}/\rho_{xy}) \lesssim 10^{-7}$, $\rho_{xx}^{\min} \lesssim 10^{-3} \Omega/\square$. В измерениях² было установлено, что при «больших» отклонениях $\delta\rho_{xy}$ связано с ρ_{xx} соотношением $|\delta\rho_{xy}| \approx 0,2 \rho_{xx}$; подставляя сюда значение ρ_{xx}^{\min} , получаем оценку того же порядка $\delta\rho_{xy}/\rho_{xy} \sim 3 \cdot 10^{-8}$. Представляет интерес выяснить, каковы ограничения физического характера на точность квантования холловского сопротивления и минимальное значение ρ_{xx} в 2M-слое.

Подобные эксперименты проводятся, в частности, на МДП-структурках¹, которые представляют собой плоский конденсатор, одним из электродов которого является металлический затвор, а вторым служит 2M-слой электронов, индуцируемый вблизи поверхности кремния при подаче положительного

напряжения V_g на затвор. Физическим параметром в этих опытах служит концентрация электронов в 2М-слое n_s или заряд $Q_s = n_s e S$, в то время как в эксперименте контролируется лишь V_g . Естественно было бы считать, что заряд 2М-слоя всегда пропорционален $V_g - V_t$, V_t — пороговое напряжение; тем не менее влияние квантования Ландау на процесс заряда 2М-слоя требует экспериментального изучения.

Описываемые здесь эксперименты состояли в измерении тока J_g заряда конденсатора «затвор — 2М-слой» при свинчивании V_g или магнитного поля H с постоянной скоростью. Численное интегрирование результата измерения по времени давало зависимость изменения $Q_s(V_g)$ и $Q_s(H)$.

Эксперимент показал, что при сравнительно высоких температурах $T \geq 1,5$ К в магнитном поле $H \leq 85$ кЭ зависимость $Q_s(V_g)$ линейна (см. рис. 1, а) и не зависит от знака dV_g/dt , что и следовало ожидать. Ясно, что измеряя ток J_g , мы находим полный заряд МДП-структуры. С другой стороны, зная концентрацию возможных состояний на уровне Ландау $n_H = eH/c$ можно определить заряд, имеющийся только в 2М-слое, для тех значений V_g , которые отвечают серединам плато ρ_{xy} (кривая 2 на рис. 1). Обе найденные такими способами зависимости $Q_s(V_g)$ совпадают в пределах погрешности эксперимента $\sim 2\%$. Это означает, что весь заряд, вносимый в МДП-структуру, попадает в 2М-слой и, следовательно, иные резервуары электронов, кроме 2М-слоя, в ней отсутствуют.

При более низких температурах возникают гистерезисные отклонения от линейной зависимости $Q_s(V_g)$ вблизи значений $\nu = n_s n_H = 2, 4, 6, 8, \dots$, при которых наблюдаются наиболее глубокие минимумы ρ_{xx} и плоские плато ρ_{xy} . Рис. 1, б иллюстрирует поведение $Q_s(V_g)$ вблизи $\nu = 4$.

При увеличении V_g в некоторой области заряд меньше «равновесного», при уменьшении V_g заряд, наоборот, больше. Максимальная разность

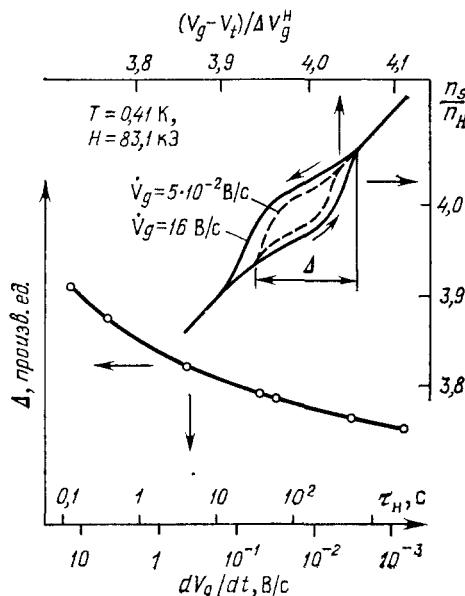


Рис. 2. Типичная форма петли гистерезиса перезаряда 2М-слоя (справа вверху) при двух значениях dV_g/dt . Зависимость ширины области гистерезиса от скорости изменения напряжения на затворе. τ_H — время заполнения одного уровня Ландау

зарядов при прямом и обратном ходе V_g быстро возрастает при уменьшении T , достигая (при $T = 0,4$ К) $\sim 10\%$ полного заряда в 2М-слое, приходящегося на один уровень Ландау (n_{des}). Отметим, что такое поведение $Q_s(V_g)$ не связывается на значениях ρ_{xy} (с точностью, по крайней мере 10^{-5}), а также на форме плато ρ_{xy} и минимума ρ_{xx} . Измерения при различных значениях dV_g/dt показали, что чем медленнее проходит область гистерезиса, тем она уже, а отклонения заряда от равновесного меньше (рис. 2). Экстраполяция зави-

симости ширины области гистерезиса от dV_g/dt дает оценку той скорости заряда, при которой аномалия полностью исчезнет. Так, например, при $T = 0,42\text{K}$ для $v = 4$ это произойдет, если время заряда одного уровня Ландау составит $\tau_H = 100$ лет.

Аналогичный гистерезис заряда 2M-слоя происходит и при изменении магнитного поля ⁴. Если поддерживать постоянным заряд в МДП-структуре, отсоединив затвор от источника напряжения, то при свипировании H наблюдается гистерезис изменения потенциала затвора относительно 2M-слоя ⁴.

Феноменологически, большие времена установления равновесного заряда в 2M-слое могут быть связаны с малыми дрейфовыми скоростями электронов вдоль градиента потенциала из-за малой величины компоненты тензора проводимости σ_{xx} . Постоянная времени установления заряда может быть оценена как $\tau \sim C_f/\sigma_{xx}$, где C_f — электрическая емкость участка МДП-структуры с неравновесным зарядом. Значение $\tau \sim 10^9$ с приводит к оценке $\sigma_{xx} < < 10^{-18} \text{ Ом}^{-1}$, т. е. $\rho_{xx} < < 10^{-11} \text{ Ом}/\square$. При этом в 2M-слое возникают замкнутые холловские токи, затухающие с той же постоянной времени.

Таким образом, проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что в 2M-слое электронов возможно возникают вихревые холловские токи, время затухания которых сравнимо с временем затухания токов, возбужденных в кольце из сверхпроводника. С другой стороны, из времени затухания вихревых токов получена оценка ρ_{xx} , которая говорит о том, что точность, с которой локально выполняется квантование ρ_{xy} в 2M-слое возможно составляет $(\delta\rho_{xy}/\rho_{xy}) < 10^{-16}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пудалов В. М., Семенчинский С. Г.—Поверхность, 1985, № 4, с. 5.
2. Пудалов В. М., Семенчинский С. Г.—Письма ЖЭТФ, 1983, т. 38, с. 173.
3. Пудалов В. М., Семенчинский С. Г., Эдельман В. С.—Ibidem, 1984, т. 39, с. 474.
4. Pudalov V. M., Semenchinsky S. G., Edelman V. S.—Sol. State Comm., 1984, v. 51, p. 713.