

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

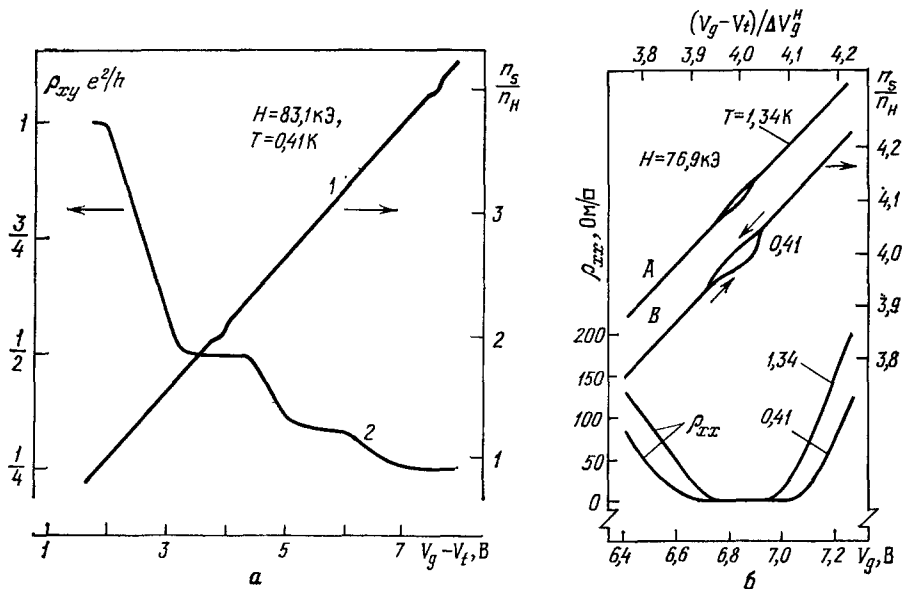


Рис. 1. Зависимости концентрации электронов n_s в 2М-слое и компонент тензора сопротивления ρ_{ik} от напряжения на затворе V_g ($dV_g/dt = 1 \text{ В/с}$).

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 $\rho_{xx}(V_g)$ 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 2М-слое (рис. 1). Минимальные отклонения от этих идеальных соотношений, которые могут быть зарегистрированы в эксперименте, определяются в основном аппаратными ограничениями и составляют $(\delta\rho_{xy}/\rho_{xy}) \lesssim 10^{-7}$, $\rho_{xx}^{\min} \lesssim 10^{-3} \text{ Ом/□}$. 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 2М-слое.

Подобные эксперименты проводятся, в частности, на МДП-структурах⁴, которые представляют собой плоский конденсатор, одним из электродов которого является металлический затвор, а вторым служит 2М-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 свипировании V_g или магнитного поля H с постоянной скоростью. Численное интегрирование результата измерения по времени давало зависимости изменения $Q_s(V_g)$ и $Q_s(H)$.

Эксперимент показал, что при сравнительно высоких температурах $T \gg 1,5 K$ 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 $n_H = eH/ch$ 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

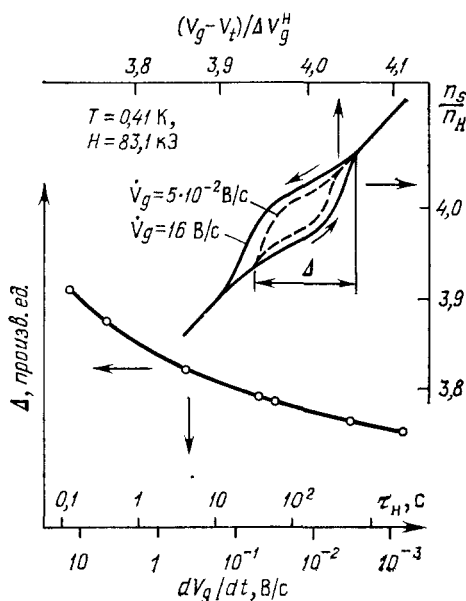


Рис. 2. Типичная форма петли гистерезиса перезаряда 2М-слоя (справа вверху) при двух значениях dV_g/dt . Зависимость ширины области гистерезиса от скорости изменения напряжения на затворе. τ_H — время заполнения одного уровня Ландау

зарядов при прямом и обратном ходе V_g быстро возрастает при уменьшении T , достигая (при $T = 0,4 K$) $\sim 10\%$ полного заряда в 2М-слое, приходящегося на один уровень Ландау ($n_s e$). Отметим, что такое поведение $Q_s(V_g)$ не сказывается 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 $\nu = 4$ это произойдет, если время заряда одного уровня Ландау составит $\tau_H = 100$ лет.

Аналогичный гистерезис заряда 2М-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 2М-слоя ⁴.

Феноменологически, большие времена установления равновесного заряда в 2М-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 2М-слое возникают замкнутые холловские токи, затухающие с той же постоянной времени.

Таким образом, проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что в 2М-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 2М-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.