

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ МАГНИТОПРОВОДИМОСТИ ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

*С.В.Кравченко, Б.К.Медведев, В.Г.Мокеров,  
В.М.Пудалов, Д.А.Ринберг, С.Г.Семенчинский*

В интервале температур 0,3–10 К и в магнитном поле до 12 Т изучены фазовые диаграммы  $\sigma_{xx} - \sigma_{xy}$  для гетероструктур GaAs и Si–МДП-структуры. Установлено, что зависимости  $\sigma_{xx}$  ( $\sigma_{xy}$ ) в пределе исчезающе малых токов и  $T \rightarrow 0$  существенно различаются для разных подуровней энергии.

Проблемы локализации электронов в двумерных системах в присутствии сильного магнитного поля исследуются довольно давно, однако достаточной ясности в понимании этих вопросов пока нет. Экспериментально не исследован, в частности, в условиях целочисленного квантового эффекта Холла (ЦКЭХ) вид диаграмм  $\sigma_{xx} - \sigma_{xy}$  для различных подуровней энергии при отсутствии их перекрытия, а сведения о поведении  $\sigma_{xx}$  при  $T \rightarrow 0$  довольно противоречивы<sup>1, 2</sup>. В различных вариантах теории<sup>3–5</sup> и<sup>6, 7)</sup> также нет единого мнения о виде фазовых диаграмм магнитопроводимости.

В данной работе проведены экспериментальные исследования процессов локализации по температурной зависимости  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{xy}$  на различных спиновых и долинных подуровнях энергии. В отличие от ряда предыдущих, измерения выполнены при очень малых измерительных токах (0,1–10 нА), так как значения проводимости при полуцелом заполнении подуровней чрезвычайно чувствительны к величине тока. Как оказалось, зависимости  $\sigma_{xx}$  ( $\sigma_{xy}$ ) для четных и нечетных номеров подуровней сильно различаются, тогда как согласно скейлинговой теории<sup>3–5</sup> можно было бы ожидать их одинакового поведения на всех уровнях.

**Эксперимент.** Изучались образцы прямоугольной формы – гетероструктуры GaAs/AlGaAs (GaAs-1:  $\mu = 250000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $n = 4,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ; GaAs-2:  $\mu = 70000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $n = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) и Si–МДП-структура ( $\mu = 35000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ). Сопротивления  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{xy}$  измерялись одновременно на переменном токе частоты 3,7 Гц с помощью двух фазовых детекторов. При  $T = 0,35$  К зависимость кинетических коэффициентов от тока начиналась, когда ток превышал 30 нА, поэтому все приведенные результаты получены при токе 3 нА. Даные накапливались в ЭВМ, с помощью которой вычислялись проводимости  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{xy}$ .

На рис. 1 представлены зависимости  $R_{xx}(H) = 10 \cdot \rho_{xx}(H)$  и  $\rho_{xy}(H)$  для образца GaAs при двух значениях температуры. При  $T = 1,5$  К частично разрешено спиновое расщепление первого и второго уровней Ландау. Понижение температуры до 0,35 К приводит к их полному расщеплению и частичному расщеплению третьего. Холловские плато при понижении температуры расширяются, а пики  $\rho_{xx}$  сужаются. С понижением температуры значения  $\rho_{xx}^{max}$  на уровнях 1, 2 и 3 уменьшаются. Отметим, что максимумы  $\rho_{xx}$ , отвечающие полуцелому заполнению подуровней  $\uparrow$ , заметно меньше максимумов для подуровней  $\downarrow$ .

Диаграммы  $\sigma_{xx} - \sigma_{xy}$  для образца GaAs-1 приведены на рис. 2 (значения проводимостей даны в единицах  $e^2/h$ ). По мере понижения температуры с 9,2 до 0,35 К происходит расщепление уровней Ландау и появление нулевых значений  $\sigma_{xx}$  при  $\sigma_{xy} = 3e^2/h$  и  $5e^2/h$ . Кривые  $\sigma_{xx}$  ( $\sigma_{xy}$ ), соответствующие подуровням  $1\uparrow$  и  $2\uparrow$ , лежат значительно ниже кривых, соответствующих подуровням  $1\downarrow$  и  $2\downarrow$ , и эта разница растет с понижением температуры. Кроме того, при  $T = 0,35$  К зависимости  $\sigma_{xx}$  ( $\sigma_{xy}$ ) для подуровней  $\uparrow$  становятся асимметричными. Штриховые линии, соединяющие кривые, соответствуют одинаковым значениям фактора заполнения  $v$ . При понижении температуры они устремляются к точкам  $(0, Ne^2/h)$ , где  $N$  – целое число. Повышение измерительного тока уменьшает различие между проводимостью на четных и нечетных подуровнях и в общих чертах эквивалентно повышению температуры.

Температурные зависимости проводимости при полузелом заполнении подуровней  $\sigma_{xx}^{max}(T)$  для этого же образца изображены на рис. 3. По мере понижения  $T$  проводимость растет, достигая максимума при некоторой  $T_{sc}$ , а затем уменьшается. Величина  $T_{sc}$  для нечетных подуровней ( $\nu = 2,5$  и  $4,5$ ) заметно превышает  $T_{sc}$  для соответствующих четных подуровней. При  $T = 0,35$  К значения  $\sigma_{xx}^{max}$  для  $\nu = 2,5$  и  $4,5$  примерно в 2 раза меньше, чем для  $\nu = 3,5$  и  $5,5$ . Аналогичное соотношение высот  $\sigma_{xx}^{max}$  наблюдается и на Si-МДП-структуре для  $\nu = 2,5$  и  $3,5$ . Электроны этих подуровней ( $0+\downarrow$  и  $0-\downarrow$ ) принадлежат разным долинам и имеют одинаковое направление спина. В образце GaAs-2 с меньшей подвижностью значения  $\sigma_{xx}^{max}$  для  $\nu = 2,5$  и  $3,5$  отличаются не более чем на 20 % и составляют при  $T = 0,6$  К соответственно  $0,4$  и  $0,5 e^2/h$ .

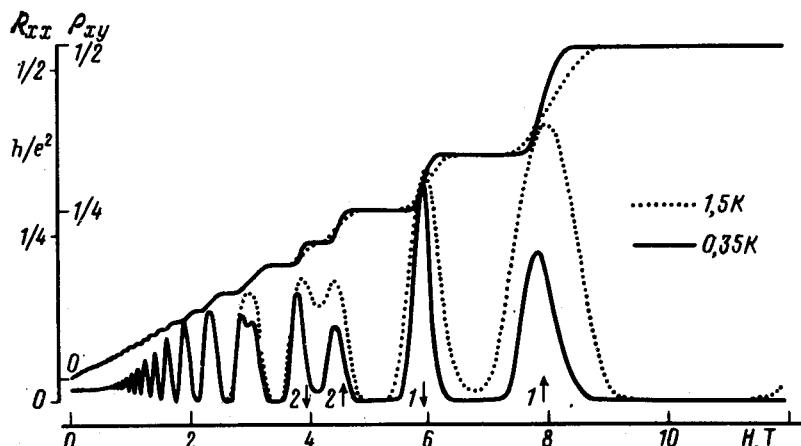


Рис. 1

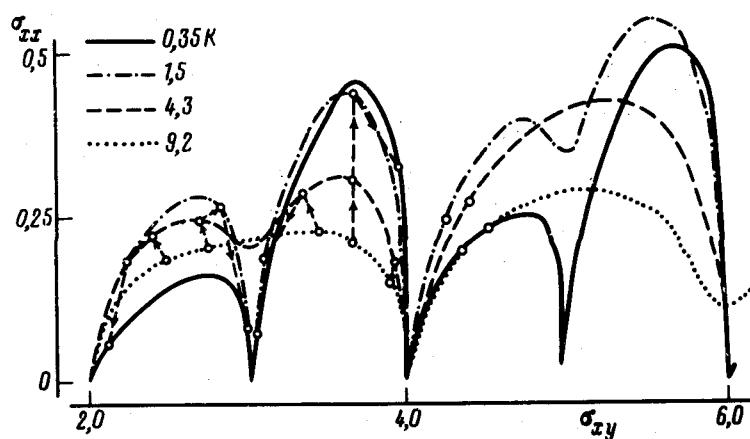


Рис. 2. Фазовые диаграммы  
для образца GaAs-1

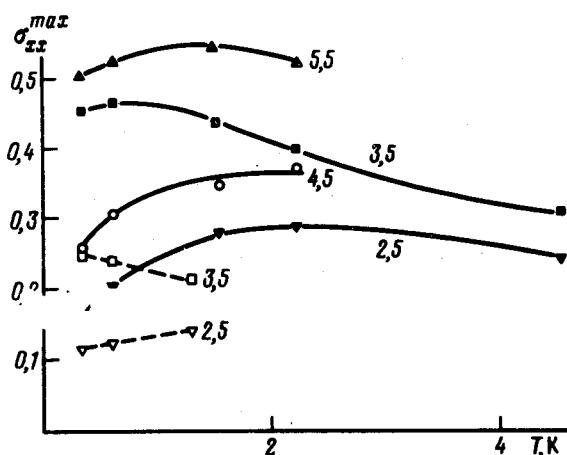


Рис. 3. Зависимости  $\sigma_{xx}^{max}(T)$  для GaAs-1  
(сплошные линии) и Si-МДП (штриховые линии). У кривых указан фактор заполнения

**Обсуждение результатов** мы проведем в рамках скейлинговой теории. Увеличение проводимости по мере уменьшения температуры в квазиклассической области – при  $T > T_{sc} \sim \Gamma/K$  ( $\Gamma$  – ширина уровня) – связано с сужением фермиевского распределения<sup>9</sup>. Согласно<sup>3-5</sup>, при  $T < T_{sc}$  величина  $\sigma_{xx}^{max}$  должна стремиться к определенному значению  $\sigma_0 \sim 0,45 e^2/h$ <sup>8</sup>. Этот вывод, сделанный для ЦКЭХ, получил экспериментальное подтверждение в работе<sup>9</sup> для образца со сравнительно низкой подвижностью. Приведенные на рис. 3 результаты для подуровней  $1\downarrow$  и  $2\downarrow$  в GaAs-1 и результаты для GaAs-2 также не противоречат<sup>3-5</sup>.

Однако такое поведение  $\sigma_{xx}^{max}$  ожидается в теории лишь в случае относительно большого беспорядка. В ином случае с понижением температуры развивается дробный КЭХ с появлением нулей  $\sigma_{xy} = 1/3e^2/h, 2/3e^2/h$  и т. д.<sup>10</sup>. Случаю малого беспорядка не противоречат кривые на рис. 3 для  $\nu = 2,5$  и  $4,5$  (GaAs-1) и  $\nu = 2,5$  и  $3,5$  (Si). Можно предположить, что вследствие различия формы плотности состояний или процессов рассеяния проводимость на четных и нечетных подуровнях в GaAs при  $T \approx T_{sc}$  оказывается по разные стороны от сепаратрисы, разделяющей области ЦКЭХ и ДКЭХ на фазовой плоскости. В результате зависимости  $\sigma_{xx}$  ( $\sigma_{xy}$ ) начинают притягиваться к разным сепаратрисам – целочисленной и дробной, лежащей значительно ниже. Возможно, именно развитием ДКЭХ объясняется появление асимметрии зависимостей  $\sigma_{xx}$  ( $\sigma_{xy}$ ) для уровней  $\uparrow$ . Эта интерпретация данных рис. 3 позволяет нам оценить критическое значение проводимости в максимуме разделяющей сепаратрисы  $\sigma_0 \approx 0,35 - 0,45 e^2/h$ . В Si-МДП-структуре на обоих подуровнях проводимость оказывается значительно ниже оцененного значения  $\sigma_0$ , поэтому исходя из скейлинговой теории следует ожидать, что при дальнейшем понижении температуры значения  $\sigma_{xx}^{max}$  будут уменьшаться. Это предположение подтверждается развитием ДКЭХ с  $\nu = 4/3$  в данной МДП-структуре при  $T < 1$  К.

Таким образом, обнаруженные в работе закономерности в основном удается проинтерпретировать в рамках скейлинговой теории. Однако окончательные выводы о причинах различия магнитопроводимости на четных и нечетных уровнях можно будет сделать лишь после проведения измерений при более низких температурах и изучения процессов рассеяния и формы плотности состояний для разных подуровней.

#### Литература

1. Ebert G., Von Klitzing K., Probst C., Ploog K. Sol. St. Comm., 1982, **44**, 95.
2. Paalanen M.A., Tsui D.S., Gossard A.C. Phys. Rev. B., 1982, **25**, 5566.
3. Levine H., Libby S.B., Pruisken A.M.M. Phys. Rev. Lett., 1983, **51**, 1915.
4. Хмельницкий Д.Е. Письма в ЖЭТФ, 1983, **38**, 454.
5. Pruisken A.M.M. Phys. Rev. B., 1985, **32**, 2636.
6. Ando T. Surface Sci., 1986, **170**, 243.
7. Aoki H., Ando T. Ibid, 249.
8. Hikami S. Phys. Rev. B., 1984, **29**, 3726.
9. Wet H.P., Ysui D.C., Pruisken A.M.M. Phys. Rev. B., 1986, **33**, 1488.
10. Laughlin R.B. et al. Phys. Rev. B., 1985, **32**, 1311.