

## ПЕРЕХОДЫ МЕЖДУ БЕЗДИССИПАТИВНЫМ И ДИССИПАТИВНЫМ СОСТОЯНИЯМИ

### НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ GaAs – Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As В КВАНТОВОМ ЭФФЕКТЕ ХОЛЛА

В.Г.Мокеров, Б.К.Медведев, В.М.Пудалов,  
Д.А.Ринберг, С.Г.Семенчинский, Ю.В.Слепнев

Изучено явление пробоя в GaAs – гетеропереходе при  $T = 0,35 \div 3,5$  К;  $H \sim 120$  кЭ. Обнаружены: существование метастабильных состояний с временем жизни от  $10^{-3}$  до  $> 100$  с, развитие пробоя в виде цепочки субскачков  $\rho_{xx}$ , существование гистерезиса у каждого из субскачков  $\rho_{xx}$  в отдельности и влияние направления холловского поля на вольт-амперную характеристику пробоя.

Интересным, но малоизученным аспектом квантового эффекта Холла (КЭХ) является пробой, т. е. резкое скачкообразное увеличение сопротивления  $\rho_{xx}$  в двумерном (2М) слое, возникающее с ростом транспортного тока  $J_x$ . Имеющиеся экспериментальные данные по пробую противоречивы, а в теории не существует общепринятой модели этого явления. Наиболее четко явление пробоя проявляется в гетеропереходах GaAs – AlGaAs<sup>2,3</sup>. По этой причине нами предпринято изучение пробоя в гетеропереходе GaAs – AlGaAs. Использовались образцы холловской геометрии (рис. 1, врезка),  $L = 1,5$  мм,  $W = 0,2$  мм с концентрацией электронов  $n = 5,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и подвижностью  $\mu = 1,3 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с при  $T = 4,2$  К. В эксперименте снималась зависимость напряжения  $V_x$  на контактах 1,2 (или 3,4) от тока  $J_x$  через структуру. Интервал изменения магнитного поля  $H \approx 110 \div 122$  кЭ соответствовал холловскому плато с числом заполнения уровней Ландау  $\nu \approx 2$ .

**Результаты экспериментов.** Характерные зависимости  $V_x(J_x)$  показаны на рис. 1, 2. Ток пробоя  $J_c$  увеличивается с уменьшением  $H$ , причем несимметрично относительно середины плато  $\rho_{xy}$  ( $H_0^{pl} = 115,1$  кЭ) или середины минимума  $\rho_{xx}$  ( $H_0^{min} = 112,9$  кЭ). Одновременно падает амплитуда скачка  $\rho_{xx}$ , исчезая при  $H \approx 110$  кЭ.

Вблизи  $J_x = J_c$  в двумерном слое появляются 2 метастабильных состояния (МС): 1) практически бездиссипативное и 2) диссипативное с сопротивлением на несколько порядков выше, чем у первого. Характерные времена жизни этих состояний 2М-слоя вблизи пробоя меняются от  $\sim 10^{-3}$  с – меньше поля – до времен превышающих время эксперимента ( $\geq 100$  с) – большие поля. При меньших полях наблюдаются сильные шумы  $V_x$  при  $J_x \approx J_c$  и пробой происходит в виде одного, реже двух скачков. При постоянном  $J_x$  зависимость  $V_x$  от времени в этих условиях представляет из себя широкополосный шум на фоне перебросов из одного состояния в другое (врезка рис. 2). С увеличением  $J_x$  увеличивается время пребывания системы в диссипативном состоянии.

С ростом  $H$  времена жизни МС увеличиваются, шум снижается, возникают несколько (от 2 до 5) субскачков  $V_x$ . Крутизна фронта каждого из субскачков увеличивается, амплитуды скачков растут вместе с ростом полного скачка – (см. рис. 2) и появляются гистерезисные явления при реверсе развертки тока. Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) в области больших полей показана на рис. 1. Было установлено, что гистерезис скорее является функцией тока, чем времени развертки. Однако следует отметить, что нет полной воспроизводимости положений субскачков по оси токов даже при неизменном значении  $dJ_x/dt$ . Внешнее воздействие, например, подключение измерительного прибора, может стимулировать скачки. Значение  $J_c$  зависит от предьстории образца и может различаться в разные дни.

Вид ВАХ заметно меняется при изменении направления  $J_x$ , однако при одновременном реверсе  $J_x$  и  $H$ , т. е. при неизменном направлении холловского поля, вид характеристики не изменяется.

Для того, чтобы выяснить, связан ли пробой с контактными явлениями, в отдельном опыте ток пропускался вначале через контакты И – С, а затем – через I – С или 3 – С (см.

врезку на рис. 1). Напряжение  $V_x$  при этом измерялось на свободных контактах. Идентичность полученных ВАХ указывает на то, что пробой связан с условиями во внутренней области образца, а не в области контактов.

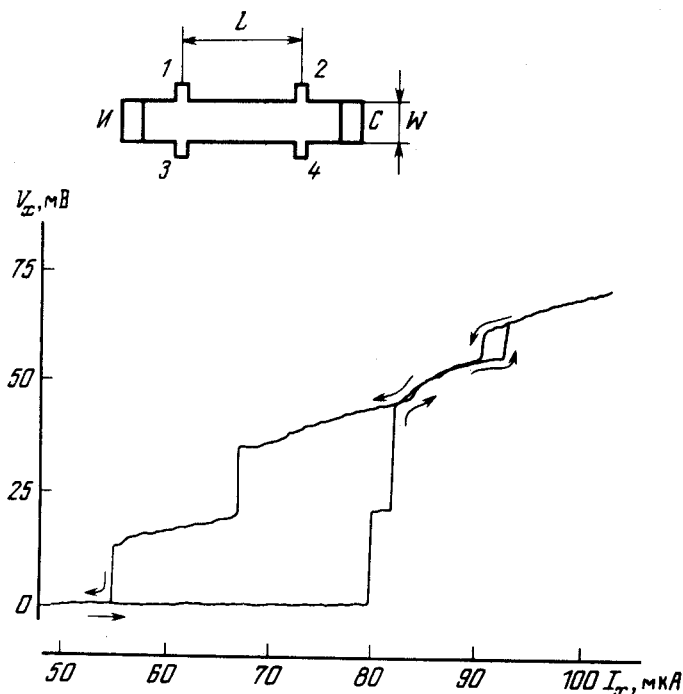


Рис. 1. Фрагмент вольт-амперной характеристики вблизи пробоя:  $H = 115,3$  кЭ,  $dJ_x/dt = 2,27$  мкА/с,  $T = 0,9$  К. На врезке – геометрия образца

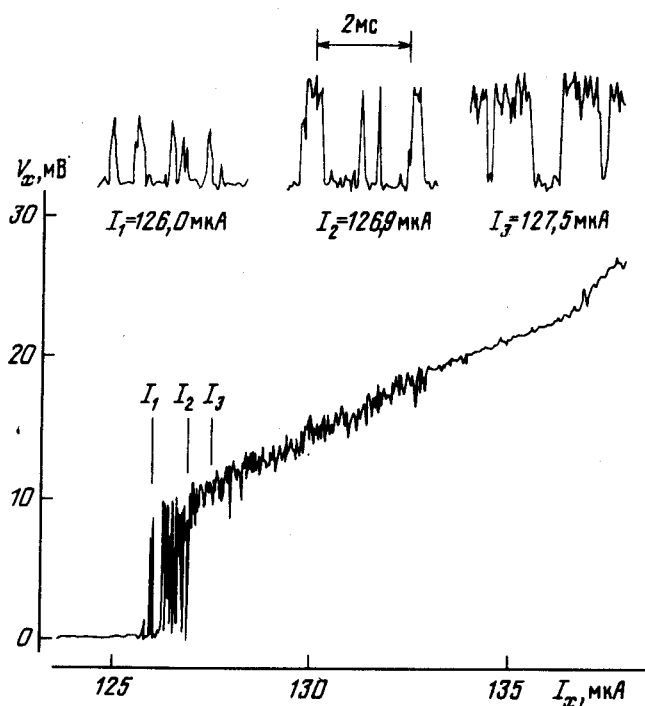


Рис. 2. Фрагмент вольт-амперной характеристики вблизи пробоя (меньше поля).  $dJ_x/dt = 11,7$  мкА/с, разрешающая способность по  $J_x - 0,023$  мкА/канал,  $H = 112$  кЭ,  $T = 0,35$  К. На врезке – зависимость  $V_x$  от времени при трех фиксированных значениях тока  $J_x$

**Обсуждение результатов.** В предположении однородного распределения тока по ширине канала  $W$  дрейфовая скорость электронов при  $J_x = 100$  мкА составляет  $v_d = 6 \cdot 10^4$  см/с, электрическое поле  $E_y^{exp} = 60$  В/см. Перед пробоем  $\rho_{xx} \sim 5 \cdot 10^{-2}$  Ом/□ ( $T = 0,95$  К,  $\kappa = 112,9$  кЭ), а после пробоя  $\rho_{xx} \sim 10$  Ом/□ в тех же условиях.

В модели фононного механизма<sup>1, 4</sup> пробой наступает при достижении дрейфовой скоростью скорости звука (в GaAs минимальное значение  $v_s = 2,5 \cdot 10^5$  см/с). Видно, что для согласования этой модели с экспериментом необходимо предположить, что эффективная ширина канала  $W_{eff}$  составляет  $\sim 0,25$  от его геометрической ширины  $W$ .

В модели зинеровского туннелирования в поперечном электрическом поле<sup>2</sup> пробой происходит при достижении холловским полем значения  $E_y^{mod} = \Delta/a_H e$ ,  $\Delta$  – энергетическая щель,  $a_H$  – магнитная длина. При  $H = 120$  кЭ  $E_y^{mod} = 10^4$  В/см. Таким образом в этой модели необходимо предположить, что эффективная ширина токонесущей части канала в  $E_y^{mod}/E_y^{exp} \sim 150$  раз меньше  $W$ . Возможно, однако, что туннелирование происходит не через щель  $\Delta$ , а между локализованными состояниями в промежутке между уровнями Ландау (плотность этих состояний, как известно<sup>3</sup>, отлична от 0).

Обсудим результаты эксперимента в рамках феноменологической модели перегретой неустойчивости  $2M$ -электронной газа<sup>3, 5</sup>. Численные оценки токов пробоя по<sup>5</sup> согласуются с нашими данными. Независимость гистерезиса от скорости развертки также говорит в пользу этой модели. Скачок  $V_x$  отвечает диссипируемой в  $2M$ -слое мощности  $\sim 1$  мкВт, а наблюдаемое после скачка ( $J_x > J_c$ ) значение  $\rho_{xx}$  можно интерпретировать как следствие перегрева электронов  $2M$ -слоя до температур  $\sim 10^2$  К, что также не противоречит<sup>5</sup>. Конечное состояние после скачка ( $J_x > J_c$ ) соответствует заполнению диссипативной областью всего промежутка между потенциальными контактами, а каждый из субскачков – появлению в этом промежутке диссипативного домена, перекрывающего всю ширину канала. Из максимально наблюдаемого количества субскачков (т. е. доменов) получаем оценку длины домена  $L/5 = 0,3$  мм, что согласуется с ожидаемой величиной  $\sim W$ . Важным аргументом в пользу локальности пробоя и наличия отдельных доменов является проявление отдельных гистерезисов для каждого из субскачков (рис. 1).

Итак в данной работе установлено: 1) наличие существенных гистерезисов при появлении и исчезновении диссипативного состояния, причем индивидуально у каждого субскачка  $\rho_{xx}$ ; 2) время жизни "перегретого" или "переохлажденного" состояний может изменяться от  $10^{-3}$  с до  $\gg 100$  с; 3) чувствительность явления пробоя к направлению холловского вектора; 4) явления в контактах не причастны к возникновению пробоя.

#### Литература

1. Ebert G., von Klitzing K., Ploog K., Weimann G. J. Phys. C. Sol. St. Phys., 1983, 16, 5441.
2. Cage M.E., Dziuba R.F., Field B.F. et al. Phys. Rev. Lett., 1983, 31, 1374.
3. Раиба Э.И., Тимофеев В.Б. Физика и техника полупроводников, 1986, 20, 977.
4. Streda P. von Klitzing K. J. Phys. C. Sol. St. Phys., 1984, 17, L483.
5. Гуревич А.В., Минц Р.Г. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 7, 318.