

## ВЛИЯНИЕ ТОКА НА ШИРИНУ ПЛАТО В КВАНТОВОМ ЭФФЕКТЕ ХОЛЛА

В.Н.Заварицкий, В.Б.Анзин

Изучено влияние тянущего тока на ширину  $\Delta$  плато с номерами  $i = 2, 4, 6, 8$  в квантовом эффекте Холла в магнитных полях до 13,7 Т в Si – МОП-структуре при  $T \approx 1,6$  К. Получена зависимость ширины плато от тока  $\Delta^i = \Delta_0^{(i)} (1 - I/I_{кр}^{(i)})$ . Обсуждается роль локализованных эффектов.

В двумерных электронных системах (при низких температурах и в сильных магнитных полях) на кривых зависимостей  $\rho_{xy}(N_s)$  ( $\rho_{xy}$  – сопротивление Холла,  $N_s$  – концентрация двумерных носителей) наблюдаются относительно широкие "плато", на которых  $\rho_{xy}$  принимает квантованные значения.

$$\rho_{xy}^{(i)} = \hbar / ie^2, \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

при этом  $\rho_{xx}$  и  $\sigma_{xx}$  – исчезающе малы. Это явление, названное квантовым эффектом Холла, наблюдается, в частности, в инверсионных слоях МОП (металл – окись – полупроводник) – структур <sup>1</sup>. Несмотря на значительное число работ, посвященных исследованию этого эффекта, ряд вопросов до конца не решен, в том числе, неясно, какие факторы определяют ширину плато  $\Delta$ . Влияние температуры изучено довольно подробно <sup>2-4</sup>, данные о влиянии тока неполны и разноречивы, так как авторы обычно ограничивались детальным исследованием лишь одного плато. Нами изучена зависимость  $\Delta^{(i)} = \Delta^{(i)}(I)$  для четырех плато с номерами  $i = 2, 4, 6, 8$  (см. соотношение (1)).

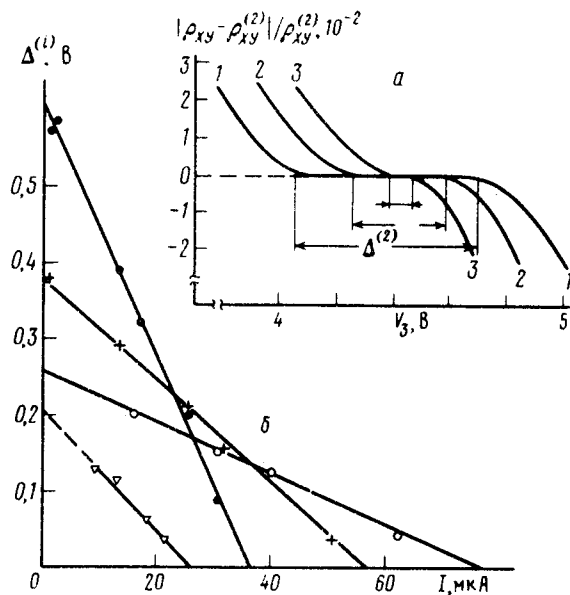
Мы использовали МОП-структуры  $n$ -типа размерами  $1200 \times 400$  мкм<sup>2</sup>, с ориентацией Si-подложки (100), толщиной слоя окиси 1300 Å. Подвижность носителей при 4,2 К  $\mu = (1,5 - 1,8) \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/В·с. Образцы были снабжены потенциальными и холловскими контактами, расстояние между которыми составляло 400 мкм. Измерения проводились на постоянном токе потенциометрическим методом при  $T \approx 1,6$  К в магнитных полях до 13,7 Т в диапазоне концентраций  $N_s = (3 \div 30) \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Положение и ширина плато воспроизводилась от опыта к опыту. При увеличении тянущего тока от 0,5 до 60 мкА наблюдалось плавное уменьшение ширины всех исследуемых плато (рис. а, б). За границу  $i$ -го плато, следуя <sup>4</sup>, принимались значения напряжения на затворе  $V_3$ , при которых  $|\rho_{xy} - \rho_{xy}^{(i)}| / \rho_{xy}^{(i)} = 10^{-3}$ . В качестве параметра избран тянущий ток. В первом приближении, как видно из рис. б, зависимость  $\Delta^{(i)} = \Delta^{(i)}(I)$  аппроксимируется соотношением:

$$\Delta^{(i)} = \Delta_0^{(i)} \left( 1 - I/I_{кр}^{(i)} \right). \quad (2)$$

В магнитном поле, перпендикулярном двумерной электронной системе, постоянная плотность состояний превращается в дискретный ряд уровней Ландау с  $E_M = (M + 1/2) \hbar \Omega_c$ ,  $M = 0, 1, \dots$ . При  $B = 13$  Т, расстояние между уровнями  $\hbar \Omega_c \approx 8$  мэВ. В  $n$ -канальных кремниевых МОП-структурах уровни Ландау четырехкратно вырождены – по спину и по долине <sup>5</sup>. В полях, снимающих это вырождение, уровень расщепляется на четыре, на каждом из которых может разместиться  $eB/h$  электронов (при  $B = 13$  Т,  $eB/h \approx 3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>). Величина спинового расщепления  $\Delta_s = g \mu_B B$  зависит от номера уровня  $M$ , так как  $g$  – фактор электрона в инверсионном слое МОП-структуры существенно уменьшается при увеличении  $N_s$  <sup>5</sup> и, соответственно,  $\Delta_s$  уменьшается от  $\approx 3$  мэВ для  $M=0$  до 2 мэВ для  $M=2$ . Долинное расщепление с увеличением концентрации растет пропорционально  $N_s$  <sup>6</sup> и при  $N_s = 3 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>,  $\Delta_v \sim 1,5$  мэВ.

Определяющую роль в квантовом эффекте Холла, видимо, играет уширение уровней и локализация состояний в их "хвостах". Плато в холловском сопротивлении возникает тогда, когда уровень Ферми  $\epsilon_F$  находится в области локализованных состояний между соответствующими уровнями. Уширение уровней определяется главным образом случайным распределением неоднородностей в системе, в частности, на границе Si/SiO<sub>2</sub> и, согласно теоретическим оценкам для Si – МОП-структуры <sup>8</sup>, составляет  $1 \div 2$  мэВ. Локализованные состояния

расположены в "хвостах" уровня, начиная с некоторой энергии  $E_c$ , называемой "углом подвижности" <sup>7</sup>. Сравнение величин  $\Delta_0^{(i)}$  показывает, что уменьшение величины  $E_c$  (т. е. степени локализации) с увеличением номера уровня играет существенную роль. Так, расчет расстояний между уровнями, ответственными за второе и четвертое плато, дает  $\approx 3$  и  $4 \div 5$  мэВ соответственно, в то же время  $\Delta_0^{(2)} > \Delta_0^{(4)}$  (см. рис. б). При больших значениях номера плато  $i$  оценка ширины  $\Delta_0^{(i)}$  затруднена в силу того, что она определяется различными комбинациями  $\hbar\Omega_c$ ,  $\Delta_s$ ,  $\Delta_v$  и общей тенденцией к уменьшению степени локализации с возрастанием номера уровня (ср.  $\Delta_0^{(6)}$  с  $\Delta_0^{(8)}$ , рис. б).



а - Влияние тянущего тока на ширину  $\Delta$  плато ( $i = 2$ ) в холловском сопротивлении при нахождении  $\epsilon_F$  между  $(0 \uparrow -)$  и  $(0 \downarrow +)$  при  $T \approx 1,6$  К,  $B = 13$  Т: 1 -  $I = 1$  мкА; 2 -  $I = 14$  мкА; 3 -  $I = 31$  мкА. б - Измеренные ширины  $\Delta^{(i)}$  плато, возникающих при нахождении  $\epsilon_F$  соответственно между: "●" -  $(0 \uparrow -)$  и  $(0 \downarrow +)$ ,  $i = 2$ ; "○" -  $(0 \downarrow -)$  и  $(1 \uparrow +)$ ,  $i = 4$ ; "▽" -  $(1 \uparrow -)$  и  $(1 \downarrow +)$ ,  $i = 6$ ; "◇" -  $(1 \downarrow -)$  и  $(2 \uparrow +)$ ,  $i = 8$ ; для различных токов,  $T \approx 1,6$  К,  $B = 13,7$  Т

Уменьшение ширины плато при увеличении тока, очевидно, связано с делокализацией электрическим полем. Как видно из рис. б, наиболее резкая зависимость  $\Delta^{(i)}(I)$  наблюдается для  $i = 2$ , где локализационные эффекты наиболее выражены.

Была проведена обработка по вышеописанной схеме всех имеющихся в литературе данных по влиянию тока на квантовый эффект Холла в Si-MOP-структурах <sup>3, 4</sup>. Зависимость  $\Delta^{(i)} = \Delta^{(i)}(I)$  для всех случаев описывается соотношением (2). Величина  $I_{кр}^{(2)}$  у Пеппера и др. <sup>3</sup> примерно в 25 раз меньше значения, полученного нами, что, возможно, связано с меньшей подвижностью исследованных ими образцов.  $I_{кр}^{(4)}$ , определенный по данным Пудалова и др. <sup>4</sup>, приблизительно на 30% меньше нашего, что может быть объяснено тем, что их результаты получены в меньшем поле ( $B \approx 9$  Т).

Очевидно, ширина плато  $\Delta$  может быть использована как один из критериев качества MOP-структуры.

В заключение авторы выражают признательность А.М.Прохорову и В.Г.Веселаго за поддержку работы и обсуждения, И.Г.Неизвестному за содействие.

#### Литература

1. Von Klitzing K., Dorda G., Pepper M. Phys. Rev. Lett., 1980, 45, 494.
2. Englert T. Lecture Notes in Phys., 1982, 177, 87.
3. Pepper M., Wakabayashi J. J. Phys. C, Solid. State Phys., 1982, 15, L861.
4. Пудалов В.М., Семенчинский С.Г. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 474.
5. Neugebauer T., von Klitzing K., Landwehr G., Dorda G. Solid State Comm., 1975, 17, 295.
6. Ando T. Phys. Rev. B., 1979, 19, 3089.
7. Ando T., Uemura J. J. Phys. Soc. Jap., 1974, 36, 959.
8. Ando T., Fowler A.B., Stern F. Rev. Mod. Phys., 1982, 54, 487.