

## ДВУМЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗ НА ПОВЕРХНОСТИ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ВБЛИЗИ ПЕРЕХОДА БЕСЩЕЛЕВАЯ—УЗКОЩЕЛЕВАЯ ФАЗА

© А.М.Хасбулатов

Дагестанский государственный университет,  
367025 Махачкала, Россия  
(Получена 5 июля 1995 г. Принята к печати 12 октября 1995 г.)

Исследованы компоненты тензора сопротивления и осцилляции Шубникова-де-Гааза на одном и том же монокристалле  $\text{Cd}_{0.16}\text{Hg}_{0.84}\text{Te}$  периодически на протяжении 10 лет. Деградация свойств объема и поверхности приводит к исчезновению осцилляций от двумерных и объемных электронов. В результате повторного травления осцилляции от двумерных электронов возникают вновь.

Исследованы гальваномангнитные явления, в том числе эффект Шубникова-де-Гааза, в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (кадмий-ртуть-теллур, КРТ) при наличии двумерного электронного газа (2DEG) на поверхности. Содержание  $\text{Cd}$   $x = 0.16$  в области гелиевых температур соответствует переходу бесщелевая—узкощелевая фаза. Эксперименты проводились на одном и том же образце с размерами  $5 \times 1 \times 0.6 \text{ мм}^3$ , хранившемся в атмосфере воздуха при нормальных условиях в течение более 10 лет, с интервалами до 5 лет.

При исследовании компонент тензора сопротивления  $\rho_{ik}$  ( $\rho_{xx}$  — поперечное,  $\rho_{zz}$  — продольное,  $\rho_{xy}$  — холловское сопротивление) серии монокристаллов КРТ ( $0.1 \leq x \leq 0.2$ ) при температуре жидкого гелия на двух из них с  $x = 0.16$  впервые были обнаружены квантовые осцилляции, обусловленные 2DEG на поверхности [1,2]. В магнитных полях  $H < 5 \text{ кЭ}$  наблюдались осцилляции Шубникова-де-Гааза (ОШГ), связанные с квантованием трехмерной системы электронов в объеме образца. Концентрация трехмерного электронного газа (3DEG), оцененная по ОШГ, оказалась равной  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  и совпадала с концентрацией, определенной из измерений коэффициента Холла в слабом магнитном поле.

В полях  $H > 5 \text{ кЭ}$  (квантовый предел для 3DEG) была обнаружена дополнительная серия квантовых осцилляций, связанных с двумерной электронной системой. 2DEG обусловлен двумерным слоем, образованным в результате естественного окисления поверхности. При хранении образцов КРТ в атмосфере воздуха на их границах

возникают различные виды окислов, которые заряжают поверхность положительно [3]. Электрическое поле  $10^5$  В/см, создаваемое заряженной поверхностью, приводит к изгибу зон и образованию слоя с 2DEG толщиной в несколько сот ангстрем в приповерхностной области КРТ. Приложение магнитного поля перпендикулярно поверхности вызывает дополнительное квантование Ландау. Концентрация 2DEG в каждой двумерной (2D) подзоне определяется из выражения  $n_s^i = (\pi \hbar c)^{-1} e / \Delta_s^i$ , где  $\Delta_s^i(1/H)$  — период ОШГ от соответствующей 2D подзоны,  $i = 0, 1, 2, \dots$  — номер 2D подзоны [4].

Итак, в скрещенных магнитном  $H$  и электрическом  $E$  полях в квантовом пределе наблюдалась серия осцилляций с разными периодами  $\Delta_s^i$ , при этом осцилляционные пики  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{xy}$  противофазны; в продольном магнетосопротивлении  $\rho_{zz}$  осцилляции не наблюдались. Оценка эффективной массы носителей из температурной зависимости амплитуды ОШГ в поле  $H = 43$  кЭ показала, что для двумерных электронов  $m_s^* = 3.5 \cdot 10^{-2} m_0$  ( $m_0$  — масса свободного электрона). Это значение существенно превышает эффективную массу электронов в объеме  $m_v^* = 2 \cdot 10^{-3} m_0$ , но меньше на порядок величины эффективной массы тяжелых дырок.

Исследования, проведенные в импульсных полях до 300 кЭ, позволили идентифицировать четкую осцилляционную картину во всем диапазоне  $H$  и определить периоды осцилляций  $\Delta_s^i$  от 5 заселенных 2D подзон [5]. Из периодов была оценена суммарная концентрация 2DEG на поверхности КРТ  $n_s \simeq 10^{13}$  см $^{-2}$ .

Теоретические расчеты [6] показывают, что для  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  в зависимости от состава, концентрации носителей на поверхности и в объеме возможны различные варианты числа заполнения 2D подзон вплоть до пяти. При этом с ростом поверхностной концентрации увеличивается глубина залегания двумерных подзон. Оценочные расчеты, проведенные нами для твердого раствора с  $x = 0.16$ , показали, что при электрическом поле  $10^5$  В/см и поверхностном потенциале 0.5 эВ в приповерхностном обогащенном двумерном слое под уровнем Ферми находятся пять 2D подзон.

На рис. 1 и 2 представлены компоненты тензора сопротивления  $\text{Cd}_{0.16}\text{Hg}_{0.84}\text{Te}$  в скрещенных полях при  $T = 4.2$  К. Магнитопольная зависимость холловского сопротивления  $\rho_{xy} = R_H H$  ( $R_H$  — коэффициент Холла) при различных временах экспозиции образца в атмосфере воздуха приведена на рис. 1. Кривая 1 взята из [2]. Временные интервалы между кривыми 1–3 составляют 5 лет: а между кривыми 3 и 4 — трое суток. Как видно из рис. 1, осцилляционный характер холловских кривых 1, 2 со временем сменяется монотонным (кривая 3). При этом зависимость  $\rho_{xy}(H)$  остается возрастающей. После травления (был снят слой 150 мкм) и экспозиции на воздухе ход холловского сопротивления (кривая 4) в магнитном поле становится типичным для материала с преобладанием проводимости  $p$ -типа. На рис. 2 приведены магнитопольные зависимости сопротивления  $\rho_{xx}(H)$  (кривые 1, 2). Кривая 1 снята через 10 лет после обнаружения поверхностных ОШГ [1,2] и имеет монотонный характер, так же как кривая 3 на рис. 1 холловского сопротивления. Зависимость  $\rho_{xx}(H)$  (рис. 2, кривая 2), полученная на свежетравленном образце, имеет так же, как и  $\rho_{xy}(H)$  (рис. 1, кривая 4), осцилляционный характер. Эксперименты, проводимые периодически

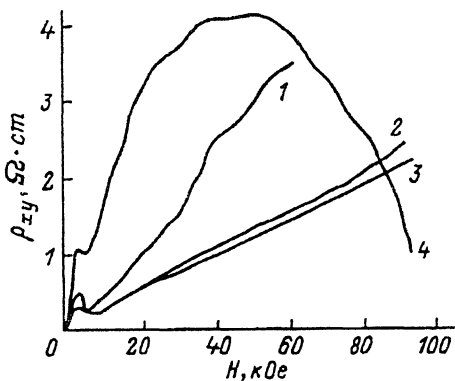


Рис. 1. Зависимость холловского сопротивления  $\rho_{xy}$  в образце КРТ ( $x = 0.16$ ) от напряженности магнитного поля при  $T = 4.2$  К и различных временах экспозиции на воздухе: 1 — данные [2], после травления; 2 —  $\sim 5$  лет, без травления; 3 —  $\sim 10$  лет, без травления; 4 —  $\sim 10$  лет, травление.

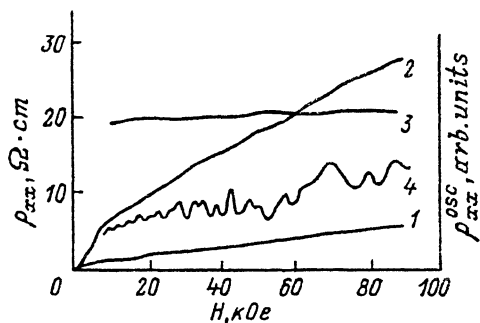


Рис. 2. Зависимость поперечного магнетосопротивления  $\rho_{xx}$  (1, 2) и осциллирующей составляющей  $\rho_{xy}^{osc}$  (3, 4) при  $T = 4.2$  К в образце КРТ ( $x = 0.16$ ) через  $\sim 10$  лет выдержки на воздухе: 1, 3 — до травления; 2, 4 — после травления.

на одном и том же монокристалле  $Cd_{0.16}Hg_{0.84}Te$ , показали, что со временем происходит спад амплитуды ОШГ, связанных с 2DEG, вплоть до их исчезновения. После травления и выдержки в атмосфере эти осцилляции возникли вновь. Зависимости  $\rho_{xx}^{osc}(H)$  на рис. 2, полученные вычитанием из  $\rho_{xx}(H)$  линейного фона, иллюстрируют исчезновение (кривая 3) и появление вновь (кривая 4) осцилляций от 2DEG на поверхности. При этом положение осцилляционных экстремумов на шкале магнитных полей совпадает с пиками поверхностных ОШГ, наблюдавшихся ранее [1, 2, 4]. Необходимо заметить, что обнаруженные в полях  $10 \leq H \leq 300$  кЭ ОШГ на  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{xy}$  связаны с поверхностным 2DEG (магнитное поле перпендикулярно поверхности) в отличие от данных работы [7], где наблюдались осцилляции в двумерных электронных каналах на границах блоков в поле, параллельном поверхности. Необходимо также отметить, что наблюдаемые в [1] ОШГ, связанные с квантованием 3DEG, исчезли в результате изменения свойств образца. Это обстоятельство так же, как и другие наблюдаемые особенности гальваномагнитных эффектов, в том числе ОШГ, связано с изменением свойств объема и поверхности образца в результате долговременной экспозиции в атмосфере.

Как известно [8, 9], длительное хранение сплавов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  приводит к деградации свойств образцов. Это обусловлено слабой связью атомов в решетке кристалла, что способствует низкому порогу генерации собственных дефектов. При этом вакансии Hg выступают как дефекты акцепторного типа, а свободные ионы ртути — донорного. Изменение свойств кристаллов КРТ в основном связано с диффузией атомов Hg к поверхности с последующим их испарением или окислением на границе. Снятие поверхностного слоя толщиной 150 мкм при травлении привело к уменьшению дефектов донорного типа, скопившихся вблизи поверхности кристалла. В результате поведение  $\rho_{xy}$  из-

менилось не только количественно, но и качественно. Однако это не повлияло на возникновение двумерных состояний на поверхности.

В заключение автор выражает благодарность за ценные указания проф. Р.В. Парфеньеву и В.В. Косареву.

### Список литературы

- [1] А.М. Хасбулатов, Д.В. Машовец, Р.В. Парфеньев. *Матер. 5 Всес. симп. «Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы»* (Львов, 1980) ч. 1, с. 47.
- [2] В.В. Косарев, А.М. Хасбулатов и др. *Тр. Всес. конф. по физике полупроводников* (Баку, 1982) т. 1, с. 213.
- [3] Н.Н. Берченко и др. *Зарубеж. электрон. техн.*, вып. 3, 3 (1981).
- [4] T. Ando, A.V. Fowler, F. Stern. *Rev. Mod. Phys.*, **54**, 437 (1982).
- [5] А.М. Хасбулатов. В сб.: *Перенос носителей заряда и тепла в полупроводниках* (Махачкала, 1986) с. 59.
- [6] Y. Takida, K. Arai, Y. Uemura. *Lect. Notes in Phys.* (Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1982) v. 152, p. 101.
- [7] В.А. Погребняк, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. *Письма ЖЭТФ*, **46**, 167 (1987).
- [8] Н.П. Гавалешко, П.Н. Горлей, В.А. Шендеровский. *Узкозонные полупроводники. Получение и физические свойства* (Киев, Наук. думка, 1984) с. 288.
- [9] R. Dornhaus, G. Nimtz. *Springer Tracts in Modern Physics*, v. 98: *Narrow-Gap Semicond.* (Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1985) p. 300.

Редактор Л.В. Шаронова

## A two-dimensional electron gas on the surface of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ near a gap-less-narrow-gap phase transition

A.M. Khasbulatov

Dagestan State University, 357025 Makhachkala, Russia

Components of the resistance tensor and Shubnikov-de Haas oscillations have been studied on the same single crystal of  $\text{Cd}_{0.16}\text{Hg}_{0.84}\text{Te}$  periodically throughout ten years. The bulk and surface degradation led to disappearance of oscillations for both of the two-dimensional (2D) and bulk electrons. Oscillations from 2D-electrons appear again after repeated etching.

---